



**Marisa de Lurdes
Pedrosa Venâncio
Nunes** **Comportamento do alumínio num sistema público de
água para consumo humano**



**Marisa de Lurdes
Pedrosa Venâncio
Nunes**

**Comportamento do alumínio num sistema público de
água para consumo humano**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Professor Dr. José de Jesus Figueiredo da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Dr.^a Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais

professora auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Armando Baptista da Silva Afonso

professor associado convidado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Professor Doutor José de Jesus Figueiredo da Silva

professor auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente ao Eng.^o Sérgio Teixeira Coelho, Investigador Auxiliar do Núcleo de Engenharia Sanitária do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

palavras-chave

Alumínio, Sistema Público de Água, Modelação Hidráulica e da Qualidade da Água, Portugal.

resumo

Por forma a satisfazer os requisitos regulamentares e as necessidades dos consumidores, as entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água têm necessidade de compreender melhor os movimentos e transformações a que a água, destinada ao consumo humano, está sujeita ao longo dos sistemas de distribuição, de modo a proteger a sua qualidade em sistemas públicos de abastecimento.

Os modelos de simulação para sistemas de transporte e distribuição de água constituem instrumentos computacionais muito utilizados e consagrados no campo do planeamento, do projecto e do diagnóstico de funcionamento, complementando o discernimento e a experiência dos técnicos envolvidos.

O desenvolvimento de um modelo de simulação fiável é, tanto para a componente hidráulica como para a de qualidade da água, uma opção vantajosa para a gestão de um sistema de abastecimento de água. A utilidade de um modelo de simulação, tanto para apoiar a exploração dos sistemas – na procura da garantia de satisfação das condições hidráulicas e de qualidade ideais – como para melhorar o planeamento de expansões e de outras intervenções, é atestada pela experiência de inúmeras entidades gestoras em todo o mundo. O Epanet 2.0 é um programa para simulação hidráulica e da qualidade da água em sistemas de transporte e distribuição de água que permite ao utilizador analisar o comportamento hidráulico e a alteração da qualidade da água num sistema de distribuição sujeito a diversas condições operacionais durante um determinado período de funcionamento.

A modelação matemática para simular o comportamento de sistemas de abastecimento de água é uma técnica empregue na análise de problemas teóricos ou em aplicações práticas e para soluções de projecto, dando um contributo para proteger os interesses dos utilizadores, com optimização da relação custo - qualidade dos serviços (eficácia e eficiência), permitindo salvaguardar a viabilidade económica dos operadores regulados e dos seus legítimos interesses, e melhorar a eficiência ambiental desta actividade.

Esta tese, desenvolvida com recurso a simulações do comportamento da água numa rede local, apresenta o comportamento do alumínio num sistema público de água e possíveis soluções para reduzir a sua concentração: acréscimo de água da origem de melhor qualidade alterando o funcionamento de grupos elevatórios, o enchimento/esvaziamento de reservatórios de nível variável e a execução de descargas/purgas.

keywords

Aluminium, Public Water System, Hydraulic and Water Quality Modelation, Portugal.

abstract

To satisfy the required government regulations and the consumers' requests, the management teams working on water supply systems feel the need to better understand the movement and the transformation reactions of water for human consumption that may occur in the distribution systems, so that the quality of the water in public supply systems can be protected.

Mathematical models for simulation of transport and distribution of water are an important tool, frequently used by professionals in this field, for planning and design the supply systems.

The development of a successful simulation model for the hydraulic component and for the water quality is a fundamental task in modern management for water supply systems. The usefulness of simulation models both for defining the best system configuration in order to guaranty the ideal hydraulic conditions and a good water quality and for planning for extensions and other interventions is uncontested and daily tested by many water management teams around the world.

Epanet 2.0 programme was used for hydraulic and water quality simulation in systems for transportation and distribution of water, allowing its user to analyse the hydraulic behaviour and the water quality along a distribution system subject to several operational conditions during a determined functioning period.

Mathematical modelling to simulate the behaviour of water supply systems is a technique used in the analysis of theoretical problems or practical applications and project solutions, and should be considered as a contribution to a better protection of the users' interests, with the optimization of the cost/quality relation of services (efficacy and efficiency), allowing a bigger safeguard of the economic viability of the regulated operators and of their own legitimate interests, and the protection of environmental aspects associated to this activity.

This thesis presents the results of simulations done for a local water network system, in order to study the behaviour of aluminium and to identify possible solutions to reduce its concentration: water addition of the origin of better quality modifying the functioning of pumping groups, the filling and emptying of reservoirs of varying level and the implementation of discharges/purges.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Aplicações dos modelos de simulação.....	2
1.2 Programa EPANET 2.0.....	3
1.2.1 Capacidades de modelação hidráulica.....	4
1.2.2 Capacidades de modelação da qualidade da água.....	5
1.2.3 Passos a seguir na utilização do EPANET.....	5
1.3 Comportamento do alumínio em solução.....	6
2. APLICAÇÃO DO MODELO À REDE EM ESTUDO.....	7
2.1 O caso de estudo.....	7
2.2 A qualidade da água e o problema do alumínio.....	7
2.3 Representação da rede.....	10
2.4 Modelação de parâmetros de qualidade da água.....	14
3. DESENVOLVIMENTO DE MODELOS PARA O CASO DE ESTUDO.....	15
3.1 Planeamento do desenvolvimento de modelos.....	15
3.2 Elementos de base.....	16
3.3 Descrição dos componentes físicos.....	16
3.4 Aspectos gerais relativos à recolha da informação de base.....	16
3.5 O traçado da rede e a localização de nós de modelação.....	17
3.6 Condutas.....	18
3.7 Consumo de água nos nós.....	19
3.8 Reservatórios.....	19
3.9 Ligação do reservatório à adução e à rede de distribuição.....	20
3.9.1 Ligação conduta de entrada – reservatório – conduta de saída.....	20
3.9.2 Reservatório com entrada de caudal abaixo da superfície livre e com regulação de caudal.....	21
3.9.3 Reservatório com entrada de caudal acima da superfície livre e com regulação de caudal.....	21
3.10 Captações.....	21
3.11 Instalações elevatórias.....	21
3.12 Válvulas.....	22
3.12.1 Utilização dos vários tipos de válvulas.....	22
3.13 Geração da representação da infra-estrutura física num modelo.....	24
3.14 Geração manual dos dados.....	24
3.15 Aplicação do modelo Epanet do caso em estudo.....	25
4. METODOLOGIA PARA DETERMINAR OS CAUDAIS A FORNECER PELA REDE.....	27
4.1 Quantificação de caudais e consumos num sistema de abastecimento.....	27
4.2 Sistemas de facturação e gestão de clientes.....	28
4.3 Concentração de consumos nos nós.....	28
4.4 Efeitos da simplificação.....	28
4.5 Caudal de perdas.....	29
4.6 Consumo-base.....	29
4.7 Factor multiplicativo do consumo.....	29
4.8 Consumos compostos – as categorias de consumo.....	30
4.9 Padrões temporais de consumo – simulação dinâmica.....	30
4.10 Grandes consumidores.....	31
4.11 Aspectos ligados à representação determinística do consumo.....	32
4.12 Métodos baseados nos dados de facturação.....	32
4.13 Área de leitura.....	32
4.14 Número de polícia.....	32
4.15 Código de ramal.....	33
4.16 Análise de dados de caudal – como estimar e representar o comportamento dos caudais medidos na rede.....	33
4.17 Tratamento de séries temporais de caudal.....	33
4.18 Determinação de padrões de consumo.....	34
4.19 Cenários a modelar.....	34
4.20 Dados do controlo operacional.....	35
4.21 Monitorização.....	35
4.22 Equipamento de medição.....	36

5. CALIBRAÇÃO E UTILIZAÇÃO DOS MODELOS PARA A REDE EM ESTUDO.....	39
5.1 Aspectos gerais.....	39
5.1.1 Fontes de erro na modelação.....	40
5.1.2 Distribuição espacial dos consumos.....	40
5.1.3 Simulação em período alargado.....	40
5.1.4 Modelos de sistemas de adução.....	40
5.2 Procedimento para calibração	41
5.2.1 Tolerância.....	41
5.2.2 Calibração no caso de estudo.....	41
5.3 Dependência das condições iniciais.....	41
5.3.1 Pressão e caudais.....	41
5.3.2 Volume nos reservatórios de nível variável e instalações elevatórias.....	42
5.3.3 Dependência temporal.....	43
5.4 Aplicações.....	43
5.4.1 Aplicabilidade e restrições.....	44
5.4.2 Tempo de percurso.....	44
5.4.3 Selecção dos locais de amostragem.....	45
5.5 Metodologia para modelação do comportamento do alumínio em sistemas de distribuição.....	45
5.5.1 Passos no desenvolvimento de um modelo para simular o comportamento do alumínio.....	45
5.5.2 Determinação de constantes cinéticas de libertação na água.....	46
5.6 Determinação do coeficiente de rugosidade.....	47
5.7 Determinação dos consumos.....	48
5.8 Simulação de condições operacionais irregulares.....	48
6. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	51
6.1 Análise hidráulica.....	51
6.2 Análise do funcionamento de reservatórios e estações elevatórias.....	55
6.3 Análise de qualidade da água.....	55
6.4 Discussão dos resultados.....	56
6.5 Concentração de parâmetros não-conservativos: o caso do alumínio.....	60
6.6 Caracterização das ETA – Estações de tratamento de água para consumo humano portuguesas.....	66
6.7 Tempo de percurso e crescimento do alumínio.....	71
6.8 Simulação do alumínio.....	71
6.9 A utilização da modelação no contexto do planeamento	73
6.10 A utilização da modelação no contexto do projecto.....	74
6.11 Requisitos regulamentares relativos a pressão.....	78
6.12 Requisitos regulamentares relativos a velocidade de escoamento nas condutas	79
6.13 Limitação da perda de carga unitária.....	79
6.14 Cenários para minimização da concentração de alumínio na rede	79
7. CONCLUSÃO	87
8. BIBLIOGRAFIA	93
9. ANEXOS	97

Lista de Quadros e Figuras

Quadros

Quadro 2.1 – Elementos utilizados para a modelação de uma rede.....	12
Quadro 5.1 – Coeficientes de rugosidade para condutas novas de abastecimento de água.....	48
Quadro 6.1 – Tipos de reagentes e de órgãos usados nas ETA portuguesas.....	67
Quadro 6.2 – Classes de ETA para águas superficiais.....	68
Quadro 6.3 – Classes de ETA para águas subterrâneas.....	68
Quadro 6.4 – Contaminante inorgânico.....	69
Quadro 6.5 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção de contaminante inorgânico.....	70
Quadro 6.6 – Tratamento complementar ou alternativo para controlo de contaminante inorgânico.....	71

Figuras

Figura 2.1 – Pontos de Amostragem.....	8
Figura 2.2 – Resultados de alumínio em pontos de amostragem de Outubro a Dezembro de 2009.....	8
Figura 2.3 – Resultados de alumínio em pontos de amostragem de Janeiro a Março de 2010.....	9
Figura 2.4 – Resultados de ferro em pontos de amostragem de Outubro a Dezembro de 2009.....	9
Figura 2.5 – Resultados de ferro em pontos de amostragem de Janeiro a Março de 2010.....	10
Figura 2.6 – Representação da rede de abastecimento com 2 origens, instalações elevatórias e reservatórios e respectivas designações.....	11
Figura 2.7 – Reservatório de nível variável – RNV 217.....	13
Figura 2.8 – Reservatório de nível variável – RNV 104.....	13
Figura 2.9 – Reservatório de nível fixo – RNF 327.....	13
Figura 2.10 – Reservatório de nível fixo – RNF 113.....	13
Figura 2.11 – Reservatórios de nível variável – RNV Elevado 13, RNV 212 e RNV 213.....	13
Figura 6.1 – Balanço de Caudal na Rede.....	51
Figura 6.2 – Representação dos caudais nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 7 h), usando uma escala que distingue valores de caudal entre 0.2 e 0.5 l/s.....	52
Figura 6.3 – Representação dos caudais nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 7 h), usando uma escala que distingue valores de caudal entre 0.5 e 1.5 l/s.....	52
Figura 6.4 – Representação dos caudais nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 7 h), usando uma escala que distingue valores de caudal entre 1 e 3 l/s.....	53
Figura 6.5 – Representação dos caudais nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 7 h), usando uma escala que distingue valores de caudal menores que 0.03 l/s.....	53
Figura 6.6 – Representação das perdas de carga nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 9 h), usando uma escala que distingue valores de perda de carga entre 0.3 e 1 m/km.....	54
Figura 6.7 – Distribuição de pressão para o período de maior consumo (dia 3, às 7 h).....	54
Figura 6.8 – Gráfico de isolinhas de cota topográfica.....	56
Figura 6.9 – Distribuição dos diâmetros.....	57
Figura 6.10 – Distribuição de tempos de percurso, após 72 horas de simulação.....	57
Figura 6.11 – Distribuição de tempos de percurso (tubagens) e consumos (nós), após 72 horas de simulação.....	58
Figura 6.12 – Tempos de percurso para os RNV e RNF.....	58
Figura 6.13 – Tempos de percurso para os RNV e RNF.....	59
Figura 6.14 – Tempo de percurso para pontos de amostragem.....	59
Figura 6.15 – Interações entre os colóides no processo de coagulação.....	62
Figura 6.16 – Variação da resistência das partículas (colóides) à coagulação e variação da turvação de uma água, com a adição de alumínio (Al^{3+}).....	62
Figura 6.17 – Variação da concentração de diferentes espécies de hidróxidos de alumínio em águas com diferentes valores de pH.....	63

Figura 6.18 – Concentrações de alumínio maiores.....	72
Figura 6.19 – A quantidade de alumínio nas tubagens e nos RNV.....	72
Figura 6.20 – Pressões máximas (nós) para o cenário de baixo consumo (tubagens).....	73
Figura 6.21 – Consumos em RNF e RNV.....	74
Figura 6.22 – Consumos em RNF e RNV.....	75
Figura 6.23 – Velocidade de escoamento (tubagens) menor para maior concentração de alumínio (nós)..	76
Figura 6.24 – Velocidade de escoamento (tubagens) maior para menor concentração de alumínio (nós)..	76
Figura 6.25 – Cenário real com os maiores valores de alumínio.....	79
Figura 6.26 – Cenário real para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).....	80
Figura 6.27 – Cenário virtual 1: Extensão de rede, ampliando-se a zona abastecida pelo RNF 113.....	80
Figura 6.28 – Cenário virtual 1: Extensão de rede para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).....	81
Figura 6.29 – Cenário virtual 2: Extensão de rede, ampliando-se a zona abastecida pelo RNF 113.....	81
Figura 6.30 – Cenário virtual 2: Extensão de rede para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens)	82
Figura 6.31 – Cenário virtual 3: Extensão de rede com fecho das válvulas 152 e 227, ampliando-se a zona abastecida pelo RNF 113.....	82
Figura 6.32 – Cenário virtual 3: Extensão de rede com fecho de válvulas para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).....	83
Figura 6.33 – Cenário virtual 4: Alterações nas potências das bombas.....	83
Figura 6.34 – Cenário virtual 4: Alterações nas potências das bombas para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).....	84
Figura 6.35 – Cenário virtual 5: Aumento da capacidade do RNV 217, alterações nas potências das bombas, extensão de rede com válvulas fechadas.....	84
Figura 6.36 – Cenário virtual 5: Aumento da capacidade do RNV 217, alterações nas potências das bombas, extensão de rede com válvulas fechadas, para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).....	85

Siglas e Abreviaturas

BAC – Biologically active carbon (carvão activado granulado com actividade biológica)

CAD – Computer-Aided Design (desenho ou projecto apoiado em computador)

ED – Electrodialysis (electrodiálise)

ETA – Estação de tratamento de água para consumo humano

GAC – Granular activated carbon (carvão activado granulado)

ID – Identificação dos objectos

IX – Ion exchange (permuta iónica)

NF – Nanofiltration (nanofiltração)

OBP – Oxidation by-products (subprodutos da oxidação)

P – Pontos de amostragem

PAC – Powdered activated carbon (carvão activado em pó)

RNF – Reservatório de nível fixo

RNV – Reservatório de nível variável

RO – Reverse osmosis (osmose inversa)

SIG – Sistema de informação geográfica

SPA – Simulação em período alargado

UOP – Unit operation/process (operação/processo unitário de tratamento de água)

VA – Válvula de alívio ou válvula de controlo da pressão a montante

VB – Válvula de borboleta

VG – Válvula genérica

VP – Valor paramétrico

VPCF – Válvula de perda de carga fixa

VR – Válvula de retenção de caudal

VRC – Válvula reguladora de caudal

VRP – Válvula redutora de pressão ou válvula de controlo da pressão a jusante

1. INTRODUÇÃO

Apesar do alumínio não aparecer normalmente em elevada concentração na água bruta, a concentração deste elemento pode ultrapassar o limite estabelecido para os parâmetros indicadores de qualidade da água para consumo humano (0.2 mg/l). Esta situação resulta da dissolução de alumínio a partir de elementos da rede de adução e distribuição de água.

O presente trabalho tem como objectivo avaliar a qualidade da água para consumo humano relativamente ao comportamento do alumínio nos diferentes órgãos de sistema de abastecimento de água para consumo público.

As redes de distribuição são tipicamente infra-estruturas enterradas, de cujos componentes apenas uma reduzida parte é fisicamente inspeccionável. Por outro lado, a capacidade efectiva de monitorização do estado dos sistemas, através de medições de pressão, de caudal ou de concentração de parâmetros de qualidade da água, por exemplo, é desproporcionadamente insuficiente no tempo e no espaço, face à complexidade das redes, ao número de pontos de consumo e à variabilidade deste.

Os modelos de simulação são ferramentas que permitem, com uma margem de erro estimável, analisar e prever o comportamento hidráulico e de parâmetros de qualidade da água do sistema, a partir das características dos seus componentes, da sua forma de operação e dos consumos solicitados. Os modelos permitem assim a rápida e eficaz realização de análises de sensibilidade e a simulação dos cenários mais variados, com suficiente aproximação, sem ser necessário interferir com o sistema em causa ou arriscá-lo em operações desconhecidas.

O modelo de simulação hidráulica de um sistema de abastecimento de água é composto por:

- (i) um conjunto de dados descritivos das características físicas do sistema, das suas solicitações – os consumos – e das suas condições operacionais;
- (ii) um conjunto de equações matemáticas (na sua maioria não-lineares) que reproduzem o comportamento hidráulico dos componentes individuais e do sistema como um todo, expressas em termos das principais variáveis de estado – por exemplo, o caudal nas condutas ou a pressão nos pontos notáveis – e instanciadas pelos dados descritivos mencionados em (i); e
- (iii) os algoritmos numéricos necessários para a resolução desse conjunto de equações matemáticas.

Um modelo de qualidade da água acrescenta, ao modelo hidráulico, equações que traduzem o transporte, mistura e transformação da concentração de substâncias que se comportem como estando dissolvidas na água. Os fundamentos da teoria de modelação de sistemas de abastecimento de água são fornecidos em detalhe no **anexo A**.

Os resultados de um modelo são expressos em termos das variáveis de estado, e reproduzem – com um nível de precisão que pode ser estimado – o comportamento do sistema real, com o objectivo de analisar situações tipificadas, existentes ou projectadas.

Para além da descrição do sistema físico, um programa de simulação possibilita ao utilizador a construção de uma descrição detalhada das solicitações – os consumos de água – e dos modos de operação, incluindo as condições impostas por níveis de reservatórios limítrofes ou ligações a outros sistemas.

Na posse desta informação, o *software* de simulação oferece a possibilidade de calcular o equilíbrio hidráulico do sistema, exprimindo de forma numérica e gráfica os valores das variáveis de estado, tais como:

- a pressão e a cota piezométrica nos pontos notáveis da rede (por exemplo, nos pontos de consumo), incluindo o nível de água nos reservatórios;
- a velocidade de escoamento, a perda de carga e o caudal nas condutas, válvulas e bombas;
- o estado de abertura/fecho ou a regulação de válvulas e bombas.

A maioria dos programas permite igualmente calcular o movimento, mistura e transformação de parâmetros físico-químicos ou bioquímicos relativos a substâncias dissolvidas na água, permitindo assim o cálculo de grandezas como a concentração em qualquer ponto da rede, o tempo de percurso da água entre dois pontos, ou (em sistemas com mais de uma origem de água) a percentagem da água consumida em cada ponto da rede que provém de determinado ponto de abastecimento. É comum designar essas funções por modelação de qualidade da água, vista como um complemento da modelação de parâmetros hidráulicos, ou modelação hidráulica.

A simulação pode ser efectuada tanto para um determinado momento no tempo – habitualmente designada por simulação estática – equivalente a uma única fotografia do sistema, como para um dado período de tempo, a intervalos pré-definidos – simulação em período alargado, ou SPA – que poderá ser comparada a um filme constituído por uma sequência de fotografias, separadas no tempo por um passo temporal pré-definido (é frequente este tipo de simulação ser designado por simulação dinâmica, por oposição à simulação estática).

A simulação em período alargado é, assim, realizada através de uma sucessão de simulações estáticas, sendo as condições de fronteira representadas pelos níveis nos reservatórios (e os volumes de armazenamento que lhes correspondem) ajustadas na transição entre cada dois momentos sucessivos.

Os resultados podem ser obtidos em formato gráfico, ou em formato numérico, igualmente para uma fotografia do sistema inteiro em determinado instante ou para um filme relativo a um determinado componente (conduta, nó, válvula, reservatório, bomba) para o período simulado.

1.1 Aplicações dos modelos de simulação

Os modelos de simulação têm múltiplas aplicações nos domínios do planeamento, projecto, operação, manutenção e reabilitação de sistemas de transporte e distribuição de água.

De entre as utilizações mais comuns poderão destacar-se:

- o dimensionamento dos sistemas, através da procura das melhores topologias, da escolha de diâmetros e materiais para as condutas e restantes componentes, e do dimensionamento de reservatórios e instalações elevatórias;
- o apoio à elaboração de planos de desenvolvimento estratégico, com recurso à simulação das grandes opções, em escala não detalhada, mas com projecções no tempo, sobretudo das solicitações (consumos);

- a simulação de problemas e cenários de operação corrente, como sejam consumos de ponta sazonal, gestão dos níveis em sistemas com múltiplos reservatórios de serviço, ou situações de emergência como falhas em grupos elevatórios ou o combate a incêndios;
- o treino de operadores em sistemas de operação complexa, evitando que a aprendizagem incorra em riscos directos para o sistema e para os consumidores;
- o controlo e a optimização de parâmetros de qualidade da água, como por exemplo a manutenção de um residual adequado de cloro, a localização de equipamentos de re-cloragem, o controlo de tempos de percurso ou a escolha de pontos de amostragem;
- a reabilitação de sistemas deficientes, e a programação das intervenções com minimização de impacto no consumidor;
- a redução e/ou recuperação da energia de bombeamento;
- o apoio à modularização das redes, pela análise da viabilidade e impacto da criação dos sectores;
- o controlo de perdas de água, por exemplo através de programas de redução de pressões de serviço.

1.2 Programa EPANET 2.0

No âmbito de um protocolo de cooperação técnica e científica, entre o IRAR-Instituto Regulador de Águas e Resíduos e o LNEC-Laboratório Nacional de Engenharia Civil, foi previsto o apoio do LNEC ao IRAR na elaboração e edição conjunta de manuais de simulação hidráulica e de qualidade da água de sistemas de abastecimento de água, para apoio à exploração das entidades prestadoras de serviços. O LNEC traduziu para Português o “Guia Epanet 2.0 em português – Simulação hidráulica e de parâmetros de qualidade em sistemas de transporte e distribuição de água”, desenvolvido pela US Environmental Protection Agency (EPA) para simulação hidráulica e de qualidade da água de sistemas de distribuição.

O propósito original da EPA, de produzir e colocar à disposição dos pequenos e médios distribuidores de água um software competente que lhes permitisse aceder a custo mínimo à tecnologia da simulação dos sistemas, foi amplamente atingido, fruto de uma filosofia transparente de distribuição gratuita tanto do programa como do seu código computacional.

Para além dos benefícios directos associados à análise dos sistemas e ao suporte à decisão em problemas de engenharia, a experiência tem demonstrado que o correcto desenvolvimento e utilização de modelos potenciam melhorias na qualidade geral da informação disponível sobre os sistemas, no conhecimento da infra-estrutura, e na articulação dos diversos sectores técnicos da entidade gestora.

O EPANET é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água de sistemas de distribuição em pressão. Uma rede é constituída por tubagens, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. O EPANET permite obter os valores do caudal em cada tubagem, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos passos de cálculo. Adicionalmente, para além de espécies químicas, o cálculo da idade da água e o rastreio da origem de água em qualquer ponto da rede também podem ser levados a cabo (Rossman, 2002).

O EPANET foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição, melhorando o conhecimento sobre o transporte e o destino dos constituintes da água para consumo humano. Pode ser utilizado em diversas situações onde seja necessário efectuar simulações de sistemas de distribuição. O estabelecimento de cenários de projecto (p. ex., expansão de uma rede existente), a calibração de modelos hidráulicos, a análise do decaimento do cloro residual e a avaliação dos consumos constituem alguns exemplos. O EPANET pode ajudar a analisar estratégias alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade da água do sistema, através de, por exemplo:

- alterações na utilização de origens de água num sistema com múltiplas origens;
- alteração de esquemas de funcionamento de grupos elevatórios e enchimento/esvaziamento de reservatórios de nível variável;
- utilização de tratamento adicional, como seja a re-cloragem;
- selecção de tubagens para limpeza e substituição (Rossman, 2002).

Em ambiente Windows, o EPANET fornece um ambiente integrado para editar dados de entrada da rede, executar simulações hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em vários formatos. Estes últimos incluem a possibilidade de visualizar mapas da rede com codificação a cores, tabelas de dados, gráficos de séries temporais e gráficos de isolinhas (Rossman, 2002).

1.2.1 Capacidades de modelação hidráulica

Uma rede completamente caracterizada (ou seja, incluindo todas as tubagens, sem simplificações) e uma modelação hidráulica fiável constituem pré-requisitos essenciais para a correcta modelação de qualidade da água. O EPANET, de acordo com Rossman (2002) contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, de que se destacam como principais características:

- dimensão (número de componentes) da rede a analisar ilimitada;
- cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc.;
- modelação de bombas de velocidade constante ou variável;
- cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo;
- modelação dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de caudal;
- modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- modelação da relação entre pressão e caudal efluente de dispositivos emissores (p. ex. aspersores de rega, ou consumos dependentes da pressão);
- possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controlos simples, dependentes de uma só condição (p. ex. altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controlos com condições múltiplas.

1.2.2 Capacidades de modelação da qualidade da água

Para além da modelação hidráulica, o EPANET fornece as seguintes possibilidades relativamente à modelação da qualidade da água:

- modelação do transporte de um constituinte não-reactivo (p. ex. um traçador) através da rede ao longo do tempo;
- modelação do transporte, mistura e transformação de um constituinte reactivo, à medida que este sofre decaimento (p. ex. cloro residual) ou crescimento (p. ex. um subproduto da desinfecção) com o tempo;
- modelação do tempo de percurso da água através da rede;
- cálculo da percentagem de caudal que, com origem em determinado nó, atinge qualquer outro nó ao longo do tempo (p. ex. cálculo da importância relativa de duas origens de água diferentes);
- modelação de reacções de decaimento do cloro no seio do escoamento e na parede da tubagem;
- utilização de cinéticas de ordem n para modelar reacções no seio do escoamento em tubagens e reservatórios;
- utilização de cinéticas de ordem 0 ou 1 para modelar reacções na parede das tubagens;
- definição de limites para a transferência de massa na modelação de reacções na parede;
- permitir que as reacções de crescimento ou decaimento sejam controladas por um valor de concentração-limite;
- aplicação à rede de coeficientes de reacção globais, que podem ser modificados individualmente para cada tubagem;
- possibilidade de relacionar o coeficiente de reacção na parede com a rugosidade da tubagem;
- definição de variação temporal da concentração ou de entrada de massa em qualquer ponto da rede;
- modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável como reactores de mistura completa, de escoamento em êmbolo ou ainda de mistura com dois compartimentos (Rossman, 2002).

Tirando partido destas possibilidades, o EPANET pode efectuar os seguintes tipos de análise:

- mistura de água a partir de diversas origens;
- determinação do tempo de percurso da água através de um sistema;
- determinação da perda de cloro residual;
- determinação do crescimento de subprodutos da desinfecção;
- rastreio da propagação de contaminantes ao longo da rede (Rossman, 2002).

1.2.3 Passos a seguir na utilização do EPANET

A modelação de um sistema de distribuição de água através do EPANET utiliza tipicamente os seguintes passos:

1. desenhar uma representação esquemática do sistema de distribuição ou importar uma descrição-base do sistema a partir de um ficheiro de texto;

2. editar as propriedades dos objectos que constituem o sistema;
3. descrever as condições de operacionalidade do sistema;
4. seleccionar um conjunto de opções de simulação;
5. executar uma simulação hidráulica ou de qualidade da água;
6. visualizar os resultados da simulação (Rossman, 2002).

1.3 Comportamento do alumínio em solução

A totalidade das reacções que ocorrem, assim como os respectivos mecanismos e velocidades, não são ainda hoje conhecidos mas, em geral, as reacções com as espécies inorgânicas são mais rápidas do que com as espécies orgânicas. A velocidade com que cada uma destas reacções ocorre é função da espécie em causa e de outros factores como o pH e temperatura da água, concentrações dos reagentes envolvidos, o facto de existir complexação por matéria orgânica (só aplicável em alguns casos) e o estado de oxidação em que a espécie já se encontra (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

O alumínio presente na água resulta da desagregação dos minerais de argila, devido às chuvas ácidas. À medida que o pH baixa, a solubilidade do alumínio aumenta e os seus teores podem tornar-se mais elevados.

A Directiva nº 98/83/CE, do Conselho, de 3 de Novembro, relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano, assim como o Decreto-Lei nº 243/2001, de 5 de Setembro e o Decreto-Lei nº 306/2007, de 27 de Agosto, consideram o alumínio como parâmetro indicador, fixando o valor paramétrico de 200 µg/l.

O problema mais importante, em termos de qualidade da água, reside no facto do alumínio residual formar, para teores acima dos 0.5 mg/l, compostos insolúveis, tais como o hidróxido de alumínio e outros. Resulta daí a formação de um precipitado esbranquiçado que torna a água não potável, por deixar de obedecer às normas fixadas quanto à turvação (Mendes e Oliveira, 2004).

A presença de alumínio em excesso, em relação às normas adoptadas para a água de consumo, conduz à degradação da sua qualidade, pelos processos de pós-floculação que provocam, além de uma turvação e de uma cor anormais, depósitos nas canalizações.

2. APLICAÇÃO DO MODELO À REDE EM ESTUDO

2.1 O caso de estudo

O sistema de abastecimento público de água abastece 1567 habitantes, o caudal diário é aproximadamente de 482 m³/dia e é composto por:

- um furo que capta 171 m³/dia de água e que abastece o RNV elevado de 100 m³ que distribui a água pela população, sendo, também, armazenada em RNV apoiado com capacidade de 75 m³ para abranger outra área residencial;
- um RNV de 10 m³ alimentado pelo caudal 311 m³/dia que é de outra origem e é encaminhado, através de uma adutora, para dois RNV apoiados, de 250 m³ cada, que elevam por bombagem para o RNV elevado, contribuindo para uma mistura de água e, ainda, é distribuído directamente a outras zonas de consumo.

O tratamento de água consiste na desinfecção bacteriológica por hipoclorito de sódio da água do furo de 171 m³/dia e por cloro gasoso da água da outra origem. A extensão total da rede é de cerca de 37,226 km de tubagens de PVC.

Os consumos-base, que representam os consumos acumulados nos nós, encontram-se no **anexo B**.

2.2 A qualidade da água e o problema do alumínio

A nova directiva relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano, assim como o Decreto-Lei nº 243/2001 e o Decreto-Lei nº 306/2007, consideram o alumínio como parâmetro indicador, fixando o valor paramétrico de 200 µg/l. A classificação do alumínio enquadra-se nos parâmetros físico-químicos.

Na qualificação da água para consumo humano, aparecem alguns parâmetros que não estão directamente ligados a aspectos sanitários. Trata-se dos chamados elementos indesejáveis, como o ferro, assim designados por não terem efeitos tóxicos, aos níveis usuais de consumo, mas por provocarem alguns inconvenientes para o utilizador, dos quais se destacam os seguintes:

- 1) Sabor desagradável;
- 2) Coloração avermelhada e aspecto turvo;
- 3) Aparição de manchas na roupa;
- 4) Formação de depósitos, em associação com o manganésio, que podem levar a diminuição progressiva do calibre das condutas;
- 5) Neutralização dos desinfectantes, podendo verificar-se um aumento do número de microrganismos presentes na água nas redes de distribuição;
- 6) Corrosão das canalizações, com libertação de metal sob forma solúvel (Mendes e Oliveira, 2004).

O valor paramétrico fixado para o ferro é de 200 µg/l.

O controlo do pH é importante no que respeita ao controlo da corrosão e da dissolução de metais e à formação de incrustações, em canalizações e acessórios com os quais a água contacta. O intervalo legal estipulado é de 6.5 a 9 unidades de pH.

A Figura 2.1 mostra os locais onde a entidade gestora recolhe amostras de água para análise de parâmetros de qualidade: nós RNF 327 (P1), 106 (P2), 172 (P3), 54 (P4), 226 (P5) e 80 (P6).

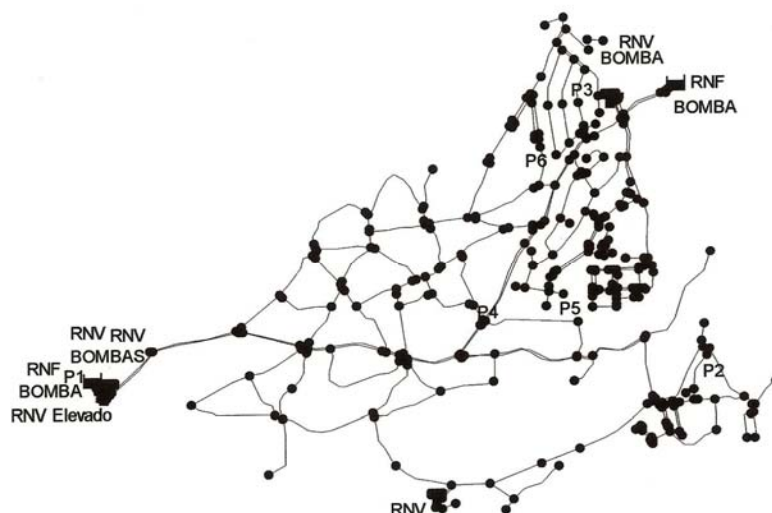


Figura 2.1 – Pontos de Amostragem.

A **variação da concentração do alumínio e ferro**, analisados em laboratório, desde Outubro de 2009 até Março de 2010, observa-se nos gráficos 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5. A **média** do parâmetro **pH** é de **7.6**. O valor do **manganês** é **inferior a 10 µg/L** e o valor do **azoto amoniacal inferior a 0.15 mg/L**. A **média** do parâmetro **cloro residual livre** é de **0.215 mg/l** e a **média** do parâmetro **turvação** é de **1.265 UNT**, para o período definido.

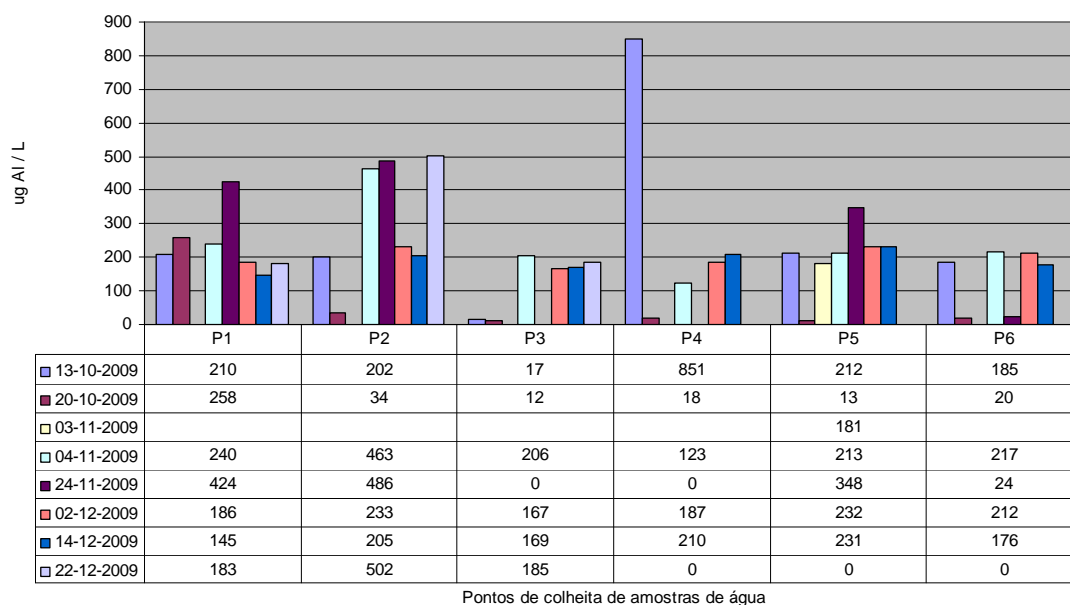


Figura 2.2 – Resultados de alumínio em pontos de amostragem de Outubro a Dezembro de 2009.

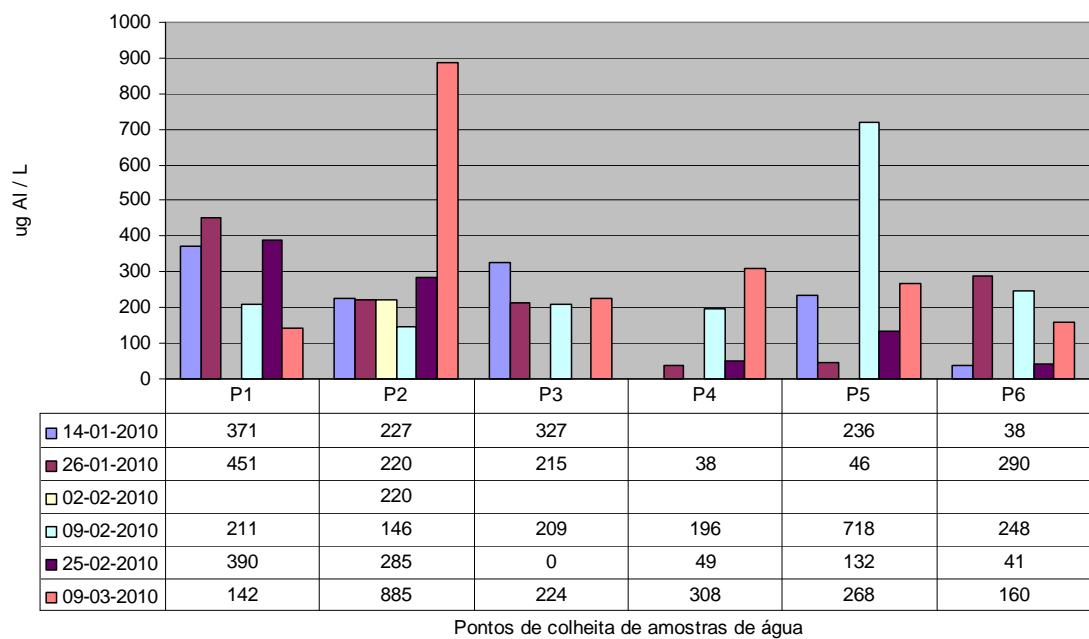


Figura 2.3 – Resultados de alumínio em pontos de amostragem de Janeiro a Março de 2010.

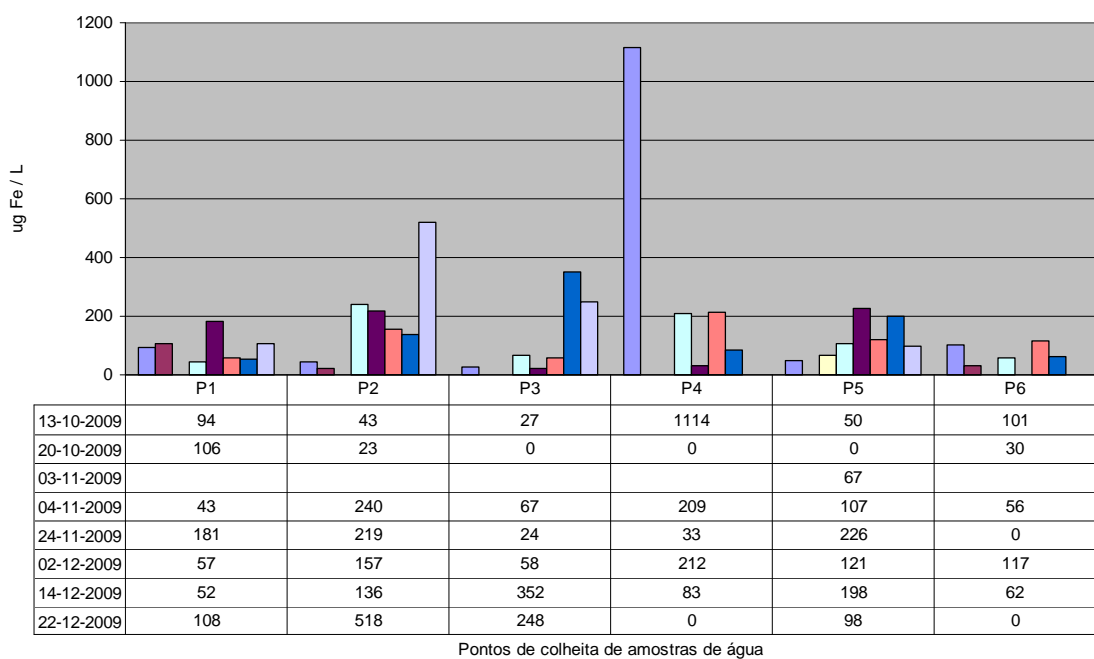


Figura 2.4 – Resultados de ferro em pontos de amostragem de Outubro a Dezembro de 2009.

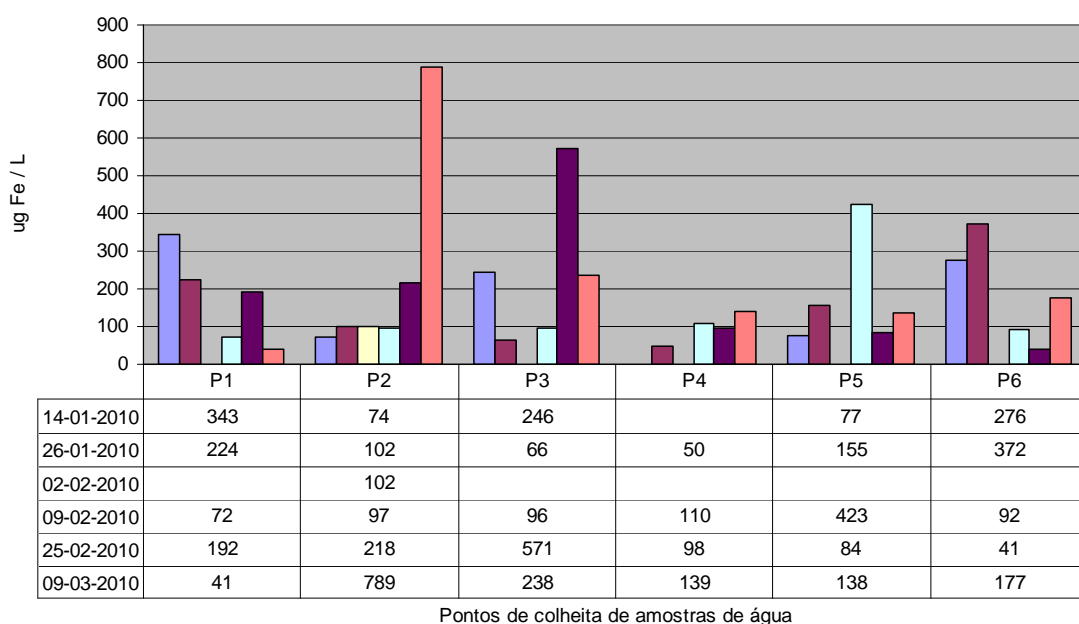


Figura 2.5 – Resultados de ferro em pontos de amostragem de Janeiro a Março de 2010.

O RNF 327 (P1), furo que fornece água ao RNV elevado, apresenta, por vezes, valores de ferro na água que excedem o valor paramétrico e da acção de grupos de organismos e factores ecológicos correlacionados, resultará um processo complexo de transformações, umas no sentido da precipitação do ferro, outras no sentido da sua solubilização.

A causa do aparecimento de alumínio é a sua concentração na água do furo que abastece o RNV elevado, que degrada a sua qualidade, por processos de pós-floculação que provocam, além de uma turvação e de uma cor anormais, depósitos nas canalizações. As velocidades demasiado baixas (os caudais mínimos encontram-se principalmente nas zonas terminais), os tempos de retenção nos reservatórios e na rede e o pH podem acarretar a ocorrência de problemas de estagnação e de sedimentação.

2.3 Representação da rede

A rede esquematizada que constitui o sistema de distribuição, que se encontra na Figura 2.6, serve uma zona urbana predominantemente residencial e apresenta a rede de abastecimento de água com a denominação dos reservatórios de nível fixo, dos reservatórios de nível variável e das bombas.

Na rede em causa, as duas origens de água possuem características bastante diferentes: o furo de pior qualidade (RNF 327) situa-se em areias argilosas e cascalheiras, com elementos mal rolados, do Plio-Plistocénico Indiferenciado e a localização do RNF 113 é determinada pela falha que põe em contacto os calcários do Dogger (Jurássico médio) com as formações cretácicas e terciárias.

A rede é servida por um reservatório elevado e quatro apoiados (RNV), com capacidade de 100 m³, 250 m³ (os reservatórios próximos do elevado), 75 m³ e 10 m³ (reservatório próximo da outra origem), respectivamente. A conduta adutora existente liga o RNV 217 aos RNV 212 e 213.

As cotas dos nós, os comprimentos, os diâmetros e a rugosidade das condutas exibem-se no **anexo B**. Os valores do coeficiente de rugosidade 140 correspondem às tubagens de PVC sem incrustações e 120 à tubagem 342 que poderá ter incrustações, devido a água medianamente dura, proveniente de outra origem e à idade da tubagem. Os diâmetros variam entre 63 mm, 75 mm, 90 mm, 110 mm, 125 mm, 140 mm e 200 mm.

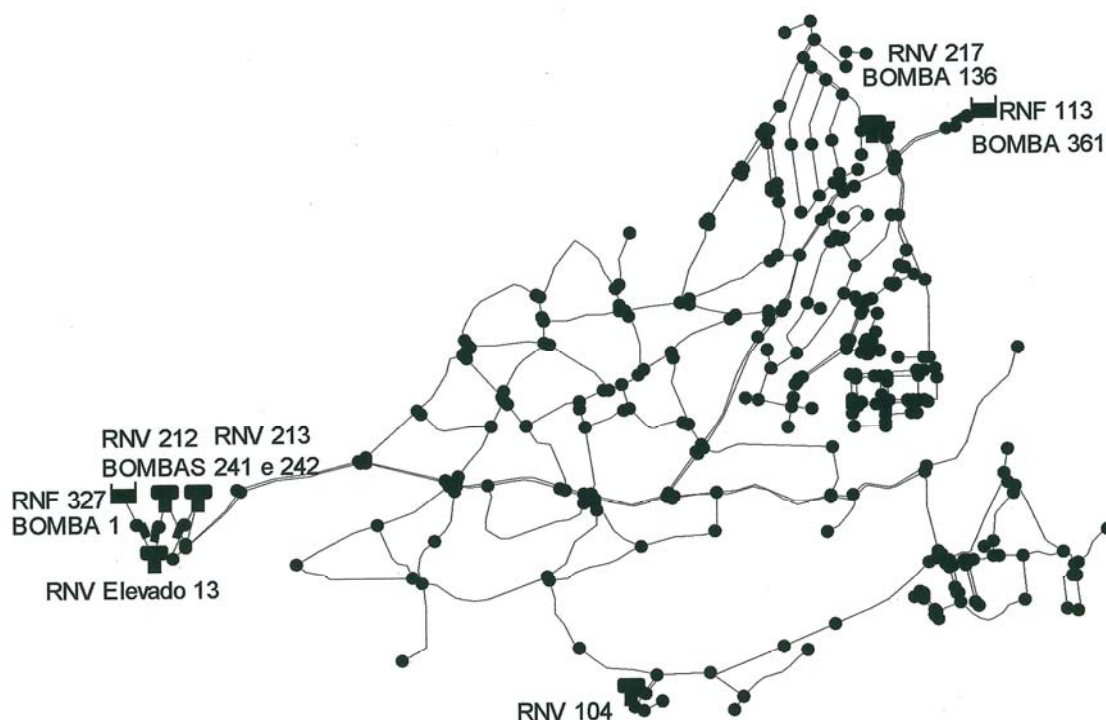


Figura 2.6 – Representação da rede de abastecimento com 2 origens, instalações elevatórias e reservatórios e respectivas designações.

O modelo do sistema de abastecimento de água parte de uma representação esquemática da rede, em que existe um conjunto de nós, cuja posição é definida através de coordenadas planimétricas e de uma cota, ligados por troços que representam os componentes físicos: condutas, válvulas e bombas. As entradas e saídas de caudal da rede (respectivamente, abastecimento e consumo) têm lugar nos nós (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Os troços são usualmente definidos por um nó de montante e um nó de jusante: o caudal será afectado de um sinal negativo se ocorrer em sentido oposto ao sentido definido para cada conduta.

Para além da sua função topológica, os nós são utilizados para identificar todos os pontos notáveis da rede, como as intersecções de condutas, mudanças de material ou de diâmetro da conduta, pontos de consumo ou de abastecimento, pontos altos e pontos baixos, pontos de medição, fronteiras de sectores de rede e outros.

No Quadro 2.1 resume-se a forma como os vários elementos da rede são modelados, assim como a sua função no modelo (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Quadro 2.1 – Elementos utilizados para a modelação de uma rede.

Elemento	Tipo	Função
Nó	Nó	Ponto de ligação entre dois ou mais troços; saída (consumo) ou entrada (abastecimento) de água no sistema.
Reservatório de nível fixo (RNF)	Nó	Armazenamento a partir de um nível de água fixo e com uma capacidade ilimitada; fornece ou recebe água do sistema.
Reservatório de nível variável (RNV)	Nó	Armazenamento com capacidade limitada e nível de água variável, em função do balanço dos caudais entrado e saído; fornece ou recebe água do sistema.
Conduta	Troço	Transporte de água entre dois nós.
Bomba	Troço	Fornecimento de energia ao escoamento entre dois nós, aumentando a sua carga hidráulica.
Válvula de controlo	Troço	Regulação do caudal ou da carga hidráulica entre dois nós.

Os reservatórios são modelados como nós especiais da rede: pontos onde são impostas condições de fronteira relativamente à superfície piezométrica, a que podem estar ou não associadas relações entre a altura de água e um volume de água armazenado.

As válvulas e as bombas – órgãos cuja acção, respectivamente, reduz ou aumenta a carga hidráulica associada ao escoamento – são habitualmente simuladas como troços, unindo nós.

Um conceito importante na representação utilizada – e na topologia e comportamento dos próprios sistemas – é a malha de rede: um conjunto de troços sucessivamente ligados entre si para que o nó de jusante do último troço seja o nó de montante do primeiro troço. As redes dizem-se emalhadas se incluem malhas, e ramificadas se não as incluem.

A modelação de qualidade da água, actualmente uma das aplicações mais comuns da simulação, necessita de modelos completos (incluindo todas as condutas) para garantir a validade da representação.

Com efeito, a não consideração de condutas hidraulicamente pouco importantes pode traduzir-se por erros consideráveis no que diz respeito à propagação de concentrações de parâmetros de qualidade da água: uma conduta com pequena capacidade de transporte e pouco relevante do ponto de vista hidráulico pode, apesar disso, transmitir uma concentração significativa do parâmetro a modelar (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

As fotografias dos reservatórios de nível fixo e dos reservatórios de nível variável do sistema público de água, em estudo, observam-se nas figuras 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11.



Figuras 2.7 e 2.8 – Reservatórios de nível variável - RNV 217 e RNV 104.



Figuras 2.9 e 2.10 – Reservatórios de nível fixo - RNF 327 e RNF 113.



Figura 2.11 – Reservatórios de nível variável – RNV Elevado 13, RNV 212 e RNV 213.

2.4 Modelação de parâmetros de qualidade da água

Os modelos do comportamento de parâmetros de qualidade da água que actualmente integram a generalidade dos programas de modelação de sistemas de abastecimento de água simulam o movimento e transformação de substâncias físico-químicas ou bioquímicas que possam considerar-se como estando em solução na água (Coelho, 1997).

Os modelos simulam três processos fundamentais. Dois desses processos são devidos ao movimento da água, e consequentemente à hidráulica do sistema: o transporte ou advecção ao longo das condutas, e a mistura nos nós de junção. O terceiro processo, que afecta substâncias não-conservativas, é o efeito conjunto de transformação inerente ao contacto e permanência dessa substância na água que circula no sistema, e que se pode dever a reacções com ela própria, com a água e com outras substâncias nela presentes, e com o material que compõe as paredes de condutas e órgãos de armazenamento. O processo de transformação pode resultar em decaimento, crescimento ou transformação noutra substância (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Outro processo que poderia ser tomado em consideração é a mistura longitudinal ao longo da direcção do escoamento. No entanto, este processo é normalmente considerado desprezável relativamente ao transporte longitudinal, dados os perfis transversais de velocidades típicos do escoamento de água em pressão e a grande diferença entre as ordens de grandeza do comprimento e do diâmetro de uma conduta (Grayman et al., 1988, Liou and Kroon, 1987, 1988).

O processo de advecção é fundamentalmente modelado pelas equações que representam o equilíbrio hidráulico, e mais concretamente pelos valores do caudal ou da velocidade de escoamento em cada troço.

A modelação do processo de mistura nos nós, que tem lugar em qualquer nó com entrada de mais do que um caudal, contando com um eventual caudal de abastecimento exterior, assume que a mistura é completa e instantânea, respeitando o princípio de conservação da massa.

Dado um conjunto de duas ou mais condutas que contribuem para um determinado nó e que transportam concentrações distintas de um dado parâmetro, a concentração desse parâmetro em todas as condutas que partem do nó é igual, e corresponde à mistura completa das concentrações de entrada na proporção dos respectivos caudais.

3. DESENVOLVIMENTO DE MODELOS PARA O CASO DE ESTUDO

3.1 Planeamento do desenvolvimento de modelos

Os aspectos mais importantes a ter em conta quando se planeia o desenvolvimento de modelos de simulação são os seguintes:

- estabelecimento dos objectivos do(s) modelo(s) e das suas utilizações prioritárias ou preferenciais – os sectores responsáveis pela exploração da rede, pelo planeamento, pelas obras e manutenção, pelo combate às perdas ou pelo controlo da qualidade da água distribuída são habitualmente utilizadores directos da modelação dos sistemas. Entre os utilizadores indirectos, que poderão beneficiar de resultados parciais ou globais, estarão os sectores responsáveis pela facturação, pela estatística, pela fiscalização urbanística ou pelo planeamento urbano. Os potenciais interessados são os responsáveis pelos outros sistemas de informação, com os quais os modelos poderão interagir ou partilhar dados: o sistema de telegestão, o sistema de cadastro ou o SIG, o sistema de informação de laboratório. Uma vez que tanto as redes de abastecimento como a informação que lhes diz respeito evolui constantemente no tempo, é importante que sejam previstos desde o início os canais adequados de actualização;
- macro-sectorização do sistema global e definição do(s) sistema(s) a estudar – os modelos desenvolvidos desta forma e após calibração hidráulica eficaz, ficarão habilitados à implementação de capacidades de simulação de parâmetros de qualidade da água, como sejam o tempo de percurso ou a concentração de cloro residual. O tempo de percurso é uma grandeza essencial para, por exemplo, o estudo de estratégias de amostragem. Os modelos deste tipo podem igualmente ser utilizados na análise da mistura de tipos de águas de qualidade distinta. Para a análise de concentrações de substâncias diluídas na água, será necessário um estudo complementar das taxas de evolução dessa substância na água que circula no sistema, e eventualmente da influência nessa evolução das características dos materiais das condutas e restantes componentes;
- definição das opções básicas de software – um dos programas mais adequados a uma introdução eficaz e perfeitamente competente à simulação de sistemas de abastecimento é o software EPANET, desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency (EUA) e traduzido para língua portuguesa pelo LNEC. As principais razões que motivam esta recomendação são as seguintes:
 - o programa adequa-se bem às necessidades actuais de simulação do sistema em questão, e está traduzido para português;
 - é fiável, bem documentado e beneficia de recursos de consulta importantes, como um newsgroup muito participado pelos melhores especialistas mundiais;
 - é de utilização livre e gratuita, não havendo quaisquer restrições ao seu uso;
 - dispõe, em particular, de boas capacidades para simulação da qualidade da água na rede, com algoritmos publicados e bem documentados;

- é um standard mundial cujo formato de dados é lido por muitos dos principais simuladores do mercado – os modelos desenvolvidos neste software podem eventualmente vir a ser transferidos com facilidade para outro software, se for opção da entidade gestora vir a adquirir numa fase posterior um simulador diferente;
- levantamento preliminar de disponibilidade de dados de cadastro, de facturação e operacionais (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

3.2 Elementos de base

A construção de um modelo de simulação passa pela recolha ou geração, e pela compilação em formatos específicos, da informação que descreve:

- (i) a topologia, geometria, altimetria e características (passíveis de influenciar o comportamento hidráulico e dos parâmetros de qualidade da água) da infraestrutura física – condutas, válvulas, reservatórios, bombas e outros elementos;
- (ii) as solicitações ao sistema, sob a forma de consumos e caudais, tanto na sua distribuição espacial como na escala e variação temporal;
- (iii) o funcionamento operacional do sistema, para os vários cenários de gestão técnica a simular (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

3.3 Descrição dos componentes físicos

Os dados físicos da rede descrevem os componentes do sistema, tais como condutas, reservatórios, válvulas e bombas, incluindo a referência de coordenadas e cotas dos nós que os definem, o traçado da rede daí resultante, e a respectiva topologia.

Os dados de consumo e de caudal procuram reproduzir o melhor possível a distribuição espacial e o comportamento temporal das solicitações ao sistema, segundo os cenários tipificados (ex. consumo em época baixa, média e alta; consumo em dia de semana, sábado e domingo). Para cada cenário modelado, consistem numa atribuição de um valor nominal de consumo a cada nó (por categoria de consumo), e de um ou mais diagramas de variação temporal (padrões de consumo).

Os dados sobre o funcionamento operacional descrevem o modo como o sistema é operado para os vários cenários de funcionamento, e traduzem-se na especificação de níveis-limite de operação nos reservatórios, no escalonamento temporal do arranque e paragem de bombas, abertura, fechamento e regulação de válvulas.

3.4 Aspectos gerais relativos à recolha da informação de base

A construção do modelo foi complementada com as fontes que seguidamente se referem:

- (i) consulta aos actuais e antigos encarregados do acompanhamento de obras e responsáveis pela manutenção da rede; a quantidade e qualidade da informação de que estas pessoas habitualmente dispõem e que não está registada é de considerável valor, não devendo em caso algum ser subestimada;

- (ii) consulta das plantas de cadastro existentes em papel e a projectos e, quando disponíveis, às telas finais das intervenções efectuadas na rede; notar que durante as obras de execução é frequente haver alterações relativamente ao projecto, muitas vezes não registadas na tela final, devendo procurar-se validar a informação recolhida deste modo junto de pessoas que tenham estado ligadas às obras;
- (iii) levantamentos directos no terreno; frequentemente há dúvidas suscitadas por informação incoerente proveniente de fontes diversas, tais como a duplicação de cadastros, que devem ser esclarecidas pela observação directa, por exemplo, da localização de válvulas, bocas de rega e incêndio, ramais, etc.; por outro lado, é fundamental conhecer as cotas topográficas onde estão instalados (ou irão sê-lo, durante a fase de calibração do modelo) os medidores de pressão, e é vantajoso conhecer as cotas de todos os nós considerados no modelo; é frequentemente necessário um levantamento directo da topologia e modo de operação das instalações especiais, como reservatórios e estações elevatórias;
- (iv) recolha de amostras de condutas, em caso de suspeita de incrustações ou como forma de verificar o estado geral daquelas; esta actividade pode ser efectuada aproveitando os trabalhos rotineiros de reparação e/ou substituição de condutas; os conhecimentos do pessoal que trabalha nestas funções foram aproveitados pro-activamente para a estimativa do estado das condutas, como propõem Coelho, Loureiro e Alegre (2006).

3.5 O traçado da rede e a localização de nós de modelação

Os nós são elementos fictícios criados para modelar pontos específicos da rede e são introduzidos sempre que há necessidade de delimitar um troço. Um troço poderá ser uma conduta, uma válvula ou uma bomba. As duas últimas categorias são habitualmente modeladas com um comprimento desprezável e justificam automaticamente um nó a montante e outro a jusante (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Já na modelação de condutas, deverão ser introduzidos nós de delimitação, pelo menos, em todos os pontos que impliquem descontinuidades nas características físicas da tubagem:

- intersecções, cruzamentos ou derivações de condutas;
- mudança de diâmetro, material, idade, classe de pressão ou outra característica da tubagem.

Para além dos nós de delimitação de troços, que são obrigatórios, os restantes nós são aquilo que se convencionou designar por nós de modelação. Estes deverão ser introduzidos nas descontinuidades e pontos notáveis de ordem hidráulica, operacional ou mesmo geográfica:

- mudanças de zona de medição e controlo, sector ou andar de pressão;
- mudanças de arruamento;
- pontos altos e pontos baixos de determinada conduta (por exemplo, onde se localizem ventosas ou descargas de fundo – os pontos extremos de cota, numa conduta, podem interessar para efeitos de verificação de valores da pressão).

Nos pontos notáveis do ponto de vista do consumo:

- grandes consumidores (p. ex.:, hospitais, escolas, centros desportivos, instalações industriais);
- consumidores sensíveis (i.e., cujo abastecimento seja particularmente importante para os objectivos do modelo);
- ao longo das condutas de serviço, localizados por forma a garantir que o número de consumidores representados por cada nó não exceda um limite predeterminado.

Nos pontos notáveis do ponto de vista das medições de rede:

- pontos de calibração de pressões;
- pontos de medição de caudal e outras grandezas.

Nos pontos em que ocorram dispositivos especiais:

- pontos de (re)cloragem;
- aspersores de rega (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Os reservatórios são formalmente nós de modelação, que têm como particularidade a possibilidade de armazenar volumes de água segundo leis pré-definidas, e de condicionar localmente a carga hidráulica, introduzindo condições de fronteira ao modelo.

Para efeitos de modelação, não é absolutamente necessário incluir na representação da rede todas as válvulas de seccionamento e/ou isolamento da rede. Os modelos actuais consideram estas válvulas como equipamento básico de qualquer conduita, e como tal não são individualizadas na representação esquemática. Qualquer conduita do modelo possui assim, por defeito, a capacidade de ser isolada através do accionamento de uma válvula de seccionamento virtual e as válvulas de retenção podem ser accionadas em qualquer conduita, sem ser necessário para o efeito introduzir especificamente a válvula. Assim, deve reter-se que as válvulas a introduzir num modelo devem, na medida do possível, cingir-se às válvulas que são efectivamente accionáveis ou reguláveis na operação do sistema.

3.6 Condutas

Num modelo de simulação, cada conduita deve ser caracterizada pelas seguintes propriedades obrigatórias: um código identificativo (ou ID), o nó inicial (onde começa a conduita), o nó final (onde termina a conduita), o comprimento (real), o diâmetro (interno) e um coeficiente de rugosidade (coeficiente da fórmula de perda de carga na conduita). Outras propriedades poderão ser descritas, com cariz opcional, como coeficientes de perda de carga singular ou de interacção com parâmetros de qualidade da água (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

A ordem pela qual são referidos os nós inicial e final é arbitrária, convencionando-se que um valor negativo do caudal numa conduita, num determinado instante de simulação, significa que o sentido do escoamento é inverso ao que foi inicialmente definido pela referida ordem.

As condutas podem estar abertas ou fechadas em determinados períodos da simulação ou quando ocorrem determinadas condições específicas de operação, tais como, quando a altura de água no reservatório de nível variável atinge determinados valores ou quando a pressão num nó está abaixo ou acima de certo valor.

As tubagens são troços que transportam água entre os vários pontos da rede. O EPANET considera que o escoamento ocorre em pressão em todas as tubagens, ao longo da simulação. O escoamento ocorre dos pontos com carga hidráulica mais elevada para os pontos com carga hidráulica mais baixa.

A opção Estado permite que, de modo indirecto, a tubagem contenha uma válvula de seccionamento ou uma válvula de retenção que permite que o escoamento na tubagem se processe apenas num sentido. No caso de uma tubagem, os dados a inserir para uma simulação de qualidade da água são os seguintes:

- coeficiente de reacção no seio do escoamento;
- coeficiente de reacção na tubagem (considerou-se o valor zero).

Em resultado da simulação, obtêm-se as seguintes grandezas relativas às tubagens:

- caudal;
- velocidade;
- perda de carga (por 1000 metros de tubagem);
- factor de resistência ou factor de Darcy-Weisbach;
- valor médio da taxa de reacção para o parâmetro de qualidade da água simulado (ao longo da tubagem);
- concentração média do parâmetro de qualidade da água simulado (ao longo da tubagem) (Rossman, 2002).

3.7 Consumo de água nos nós

As propriedades essenciais para a caracterização de um nó são o código identificativo e a cota do terreno. Os nós que representem pontos de consumo devem ainda ser caracterizados por informação relativa ao respectivo consumo-base e ao(s) padrão(ões) temporal(is) associado(s). O consumo-base representa o valor médio ou nominal do consumo de água da categoria principal de consumo no nó, medido em unidades correntes do caudal. O padrão temporal multiplica o consumo-base e representa um comportamento ao longo do tempo.

Durante a modelação, o consumo no nó em cada instante do dia resulta do produto do consumo-base pelo valor do factor multiplicativo do padrão temporal nesse instante.

3.8 Reservatórios

O EPANET versão 2.0 oferece duas formas distintas de modelar reservatórios: reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV).

Os RNF são nós especiais em que a cota da superfície livre (cota piezométrica, no caso de um furo artesiano) é fixada pelo utilizador e não é alterada pelo processo de cálculo. Utiliza-se habitualmente este formalismo para representar um reservatório de muito grande capacidade (face à magnitude dos caudais de entrada e saída), uma captação (de superfície ou subterrânea) ou um sistema vizinho, que abasteça ou seja abastecido pelo sistema a modelar e podem servir também como pontos de origem de qualidade da água. Os principais parâmetros a inserir nas propriedades do reservatório de nível fixo são o Nível de Água e, caso se pretenda, a qualidade inicial para simulações de qualidade da água. O RNF é um ponto de fronteira cujas propriedades são totalmente independentes do funcionamento da rede, o que decorre da sua capacidade ser ilimitada. Assim, a respectiva carga hidráulica e qualidade da água não podem ser afectadas pelo que se passa dentro da rede. Pelo que os resultados destes parâmetros não são alterados durante a simulação. No entanto, o utilizador pode pré-definir, para um reservatório de nível fixo, que a carga hidráulica seja variável no tempo, associando-lhe um padrão temporal. O mesmo pode ser feito para as respectivas características de qualidade da água, através da propriedade Origem de Qualidade.

Os RNV são nós especiais que possuem capacidade de armazenamento limitada, e em que o volume de água armazenado pode consequentemente ser alterado ao longo do tempo, numa simulação em período alargado. Os RNV são utilizados para modelar qualquer reservatório ou tanque cujo volume armazenado (reservatório de secção circular constante – diâmetro) e cota da superfície livre variem durante o cenário a simular, como consequência do balanço entre o caudal entrado e o caudal saído em cada passo de cálculo.

Os RNV são modelados para operar entre as alturas de água mínima (altura mínima da superfície livre acima da cota de fundo) e máxima (altura máxima da superfície livre acima da cota de fundo) especificadas pelo utilizador. A definição das alturas de água faz-se em relação à cota de soleira do reservatório. O simulador interrompe a saída ou entrada de caudal se for atingida a altura de água mínima ou máxima, respectivamente (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Os principais resultados produzidos pela simulação ao longo do tempo são:

- carga hidráulica (nível de água);
- qualidade da água (Rossman, 2002).

Os reservatórios de nível variável podem servir também como pontos de origem de qualidade da água.

3.9 Ligação do reservatório à adução e à rede de distribuição

3.9.1 Ligação conduta de entrada – reservatório – conduta de saída

Deve evitar-se a ligação de mais de uma conduta ao mesmo reservatório. A solução aconselhada, que é hidraulicamente equivalente, é a ligação do RNV a um nó de passagem ou nó de jusante, à mesma cota do terreno, através de uma conduta fictícia de comprimento unitário e diâmetro grande (com perda de carga desprezável). Nesta solução, o caudal que passa na conduta de ligação, em cada momento, é igual à diferença entre o caudal que entra e o caudal que sai do RNV (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

3.9.2 Reservatório com entrada de caudal abaixo da superfície livre e com regulação de caudal

Os RNV que não tenham funções de reservatório de extremidade devem ser modelados com uma válvula de retenção a montante do nó de jusante, de forma a impedir que a água armazenada no RNV se escoe para montante (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

3.9.3 Reservatório com entrada de caudal acima da superfície livre e com regulação de caudal

A inclusão da válvula de alívio, fictícia, é um artifício de modelação utilizado neste caso para simular uma entrada acima da superfície livre. Esta válvula é regulada para um valor de pressão correspondente à altura a que está a entrada de água no reservatório; a água só entra no reservatório se a pressão disponível for igual ou superior ao nível a que está a entrada de água (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

3.10 Captações

Num modelo, uma captação subterrânea do tipo furo ou dreno é representada por um reservatório de nível fixo (RNF) ligado a uma bomba por um troço de conduta de comprimento unitário, uma vez que, no caso de uma bomba submersível, não existe conduta de aspiração. O nível de água é a carga hidráulica correspondente ao nível de água (estático/dinâmico) (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

As bombas são troços da rede especiais que transferem energia para o escoamento, aumentando a carga hidráulica. Uma bomba caracteriza-se pelo ID da bomba, nó inicial e nó final. A bomba encontra-se ligada ao sistema de adução através de uma conduta de compressão, a qual também deve ser representada e caracterizada no modelo.

3.11 Instalações elevatórias

Uma bomba é modelada como um troço especial da rede que transfere energia para o escoamento, aumentando a sua carga hidráulica. Os principais dados a inserir no programa, relativos à bomba, são os nós inicial e final e a curva característica (combinação de valores de caudal e de carga hidráulica que definem a curva de funcionamento).

Se não for conhecida a curva da bomba (em função dos valores de caudal e valores de altura de elevação), esta pode ser representada pela potência, fornecendo um valor constante de energia ao escoamento, para todas as combinações de caudal e carga hidráulica, simplificação que pode não ser válida para toda a gama de valores de caudal.

No EPANET, o escoamento através de uma bomba é unidireccional, pelo que não é necessário a introdução de uma válvula de retenção a jusante da bomba (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

O EPANET também pode determinar o consumo de energia e o custo de bombeamento.

Se as condições de operação do sistema exigirem maior carga hidráulica do que aquela que pode ser fornecida ao escoamento pela bomba, o programa desliga a bomba. Se for necessário um caudal superior ao valor máximo, o EPANET extrapola a curva característica da bomba para o caudal pretendido, mesmo que se obtenha uma carga hidráulica negativa (Rossman, 2002).

3.12 Válvulas

Do ponto de vista da modelação, as válvulas são troços especiais de comprimento nulo, que provocam uma perda de carga de acordo com determinadas características e limitam assim a pressão ou o caudal para jusante. O nó inicial e o nó final consistem na identificação do nó de entrada e saída do escoamento na válvula, respectivamente. Na modelação é inserido o diâmetro da válvula. Os principais resultados produzidos pela simulação são o caudal e a perda de carga (Rossman, 2002).

Os principais tipos de válvulas modelados pelo EPANET são:

- Válvula de Controlo da Pressão a Jusante ou Válvula Redutora de Pressão;
- Válvula de Controlo da Pressão a Montante ou Válvula de Alívio;
- Válvula de Perda de Carga Fixa;
- Válvula Reguladora de Caudal;
- Válvula de Controlo de Perda de Carga ou Válvula de Borboleta;
- Válvula Genérica.

3.12.1 Utilização dos vários tipos de válvulas

As **válvulas de retenção (VR)** impedem que o escoamento nas condutas se processe num dos sentidos. Destinam-se geralmente a evitar a inversão do escoamento nas bombas ou a garantir que os volumes de água armazenados nos reservatórios não retornam à rede. No caso das estações elevatórias, não é necessário modelar as válvulas de retenção existentes a jusante dos grupos, uma vez que o EPANET não permite a inversão do escoamento através de um grupo electrobomba. No modelo devem colocar-se válvulas de retenção a montante dos reservatórios de nível variável, mesmo nos casos em que os reservatórios possuam uma entrada de caudal por cima, configuração que por natureza impede a inversão do escoamento. No caso do EPANET, uma válvula de retenção é modelada como um atributo da conduta, não como uma válvula individualizada – o estado inicial da conduta é neste caso especificado como possuindo uma VR, o que faz com que o escoamento na conduta se possa processar apenas do nó inicial para o nó final, e com que a conduta seja dada como fechada no caso oposto. Apresentam-se como exemplos de válvulas de retenção as de charneira, bola, disco guiado, de membrana e de pé.

As **válvulas de seccionamento** constituem o tipo de válvula mais comum nos sistemas de distribuição de água, e destinam-se a interromper o escoamento nas secções onde se encontram instaladas. São por vezes também utilizadas para regular o escoamento. Estas válvulas são utilizadas para sectorizar zonas da rede e facilitar as operações de manutenção. O simulador permite que este tipo de válvula seja definido como uma propriedade da própria conduta, a qual pode estar fechada ou aberta, simplificando, deste modo, o volume de informação a fornecer ao modelo. Apresentam-se como exemplo de

válvulas de seccionamento as de cunha, borboleta, globo, esfera, macho, tanque e flutuador.

As **válvulas de borboleta (VB)** destinam-se a regular ou a interromper o escoamento nas secções onde se encontram instaladas. As válvulas de seccionamento mais importantes são modeladas como válvulas de borboleta (TCV). Para este tipo de válvulas, o parâmetro de controlo a especificar corresponde a uma relação entre o grau de fecho e a perda de carga resultante.

As **válvulas reguladoras de caudal (VRC)** servem para limitar o caudal máximo na conduta onde estão inseridas. A regulação de caudal é efectuada através da propriedade “parâmetro de controlo”, podendo ser variável ao longo do tempo. O programa emite uma mensagem de aviso se o caudal não puder ser mantido sem que haja um aumento da carga hidráulica na válvula (i.e., mesmo quando o caudal não pode ser mantido com a válvula completamente aberta).

As **válvulas redutoras de pressão (VRP)** têm como função controlar a pressão para jusante da secção onde estão montadas, de forma a não exceder o valor especificado na propriedade “Parâmetro de Controlo”. Assim, este tipo de válvula vai fechando ou abrindo consoante a pressão a montante, de modo a provocar uma perda de carga que resulta numa pressão a jusante igual à regulação da válvula. Se a pressão a montante for inferior à regulação, a válvula abre completamente e a pressão a jusante será igual à de montante. O parâmetro de regulação é o valor desejado para a pressão a jusante.

O EPANET simula as seguintes situações de funcionamento para este tipo de válvula:

- parcialmente aberta (i.e., activa), para que a pressão a jusante seja igual a um valor pré-definido, quando a pressão a montante é superior a este valor;
- completamente aberta, se a pressão a montante está abaixo do valor pré-definido;
- fechada, se a pressão a jusante excede a pressão a montante, não permitindo que o sentido do escoamento inverta (neste caso funciona como válvula de retenção).

A **válvula de alívio (VA)** destina-se a manter um determinado valor da pressão de entrada na válvula, num determinado ponto da rede, a montante da secção onde está montada, se as condições o permitirem. Assim, a válvula está activa de forma a manter a montante uma pressão igual ao valor desejado, quando a pressão a jusante é inferior a esse valor; abre completamente se a pressão a jusante for superior a esse valor, mas inferior à pressão a montante; e fecha se a pressão a jusante for superior à de montante, pois não permite a inversão do escoamento (neste caso funciona como válvula de retenção). Este tipo de válvula é frequentemente utilizado como artifício de simulação para modelar uma entrada de caudal por cima num RNV. A válvula é regulada de modo a manter um valor mínimo de pressão a montante do RNV, igual à altura de entrada da água. Por defeito, o parâmetro de controlo da válvula deve ser regulado com um valor igual à altura máxima de água no RNV.

As **Válvulas de Perda de Carga Fixa (VPCF)** provocam uma perda de carga fixa na válvula. O escoamento através da válvula pode ocorrer em qualquer sentido. Este tipo de válvulas não constitui um componente físico da rede, no entanto pode ser utilizado para modelar situações em que existe uma perda de carga fixa que é conhecida.

As **Válvulas Genéricas (VG)** são utilizadas para representar um troço com uma lei de escoamento especial, diferente das expressões utilizadas para os restantes elementos já apresentados. Podem ser utilizadas para simular turbinas, o escoamento em poços ou válvulas de retenção de caudal reduzido.

3.13 Geração da representação da infra-estrutura física num modelo

Os dados de cadastro constituem a informação de base para a construção de um modelo exacto (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

O traçado-base do modelo da rede foi obtido no próprio ambiente de trabalho do software de simulação, tendo por base uma imagem de fundo da cartografia da zona.

Embora todo o desenho da rede tenha sido construído à escala, os pontos com maior complexidade topológica, como as instalações elevatórias, os reservatórios, as captações, foram desenhados no modelo a uma escala ampliada, para uma maior legibilidade da representação gráfica. Neste caso, os comprimentos introduzidos nas propriedades das condutas foram naturalmente os comprimentos exactos.

3.14 Geração manual dos dados

A maneira mais simples e mais tradicional de gerar a descrição da infra-estrutura física num modelo de simulação é de forma manual. Antes do advento dos ambientes computacionais gráficos, os modelos eram criados e manipulados exclusivamente através de ficheiros de texto contendo uma descrição normalizada, normalmente através de tabelas contendo a lista e as características de cada tipo de componente do sistema.

Essa forma tabular de lidar com os dados foi retida até à actualidade, e a maioria dos simuladores disponíveis no mercado continuam a suportar formatos desse tipo, que essencialmente continuam a permitir a analistas com alguma experiência a mecanização das tarefas de input.

É, por exemplo, o caso do simulador EPANET 2.0 que – embora tenha evoluído para um ficheiro de simulação em formato binário (os ficheiros .net), contendo toda a informação, tanto numérica como gráfica, necessária ao modelo e ambiente de modelação – manteve o formato de texto que utilizava desde as primeiras versões do programa (os ficheiros .inp), e que constitui mesmo um standard de facto a nível mundial.

Com as capacidades de interface gráfica hoje em dia vulgarizadas na maioria dos simuladores, construir um modelo manualmente passou a ser uma tarefa muito mais simplificada e intuitiva, efectuada de forma gráfica em ambientes semelhantes aos que se podem encontrar nos programas de CAD ou de desenho técnico. Os elementos são criados a partir de bibliotecas ou barras de ferramentas e dispostos graficamente no écran. É assim possível criar e parametrizar modelos muito rapidamente, sobretudo quando não envolvem um grande número de nós e troços.

Frequentemente são combinadas as duas formas de geração manual, começando por criar graficamente a topologia, para depois inserir as características técnicas – os dados numéricos – de forma tabular, seja no próprio ambiente de modulação, seja através do já referido ficheiro de texto.

O desenho da topologia no ambiente gráfico é grandemente facilitado pela possibilidade oferecida pelos actuais simuladores de carregar como pano de fundo a cartografia desenhada ou um ortofotomapa. Tal permite uma eficaz orientação e localização dos pontos de referência e um desenho rápido e seguro das tubagens e restantes elementos (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

3.15 Aplicação do modelo Epanet do caso em estudo

Usando a informação recolhida como foi indicada em 3.4, a construção do modelo do caso em estudo foi efectuada como seguidamente se descreve:

- 1) Consulta aos encarregados do acompanhamento de obras e responsáveis pela manutenção da rede;
- 2) Consulta das plantas de cadastro existentes em papel e de projectos;
- 3) Levantamentos directos no terreno, pela observação directa da localização de ramais, da topologia e do modo de operação dos reservatórios e das estações elevatórias;
- 4) Consulta ao pessoal que trabalha nas funções de reparação e/ou substituição de condutas cujos conhecimentos foram aproveitados pró-activamente para a estimativa do estado das condutas;
- 5) Desenho da representação esquemática do sistema: o traçado-base do modelo da rede foi obtido no próprio ambiente de trabalho do software de simulação, tendo por base uma imagem de fundo da cartografia da zona. Embora todo o desenho da rede tenha sido construído à escala, os pontos com maior complexidade topológica, como as instalações elevatórias, os reservatórios, as captações, foram desenhados no modelo a uma escala ampliada, para uma maior legibilidade da representação gráfica;
- 6) Edição das propriedades dos objectos que constituem o sistema: as propriedades essenciais para a caracterização de um nó são o código identificativo (ou ID) e a cota do terreno; os nós que representam pontos de consumo foram ainda caracterizados por informação relativa ao respectivo consumo-base e ao padrão temporal associado. Cada conduta foi caracterizada por código identificativo, nó inicial (onde começa a conduta), nó final (onde termina a conduta), comprimento (real), diâmetro (interno) e coeficiente de rugosidade (coeficiente da fórmula de perda de carga na conduta); no caso de uma tubagem, os dados inseridos para uma simulação de qualidade da água são o coeficiente de reacção no seio do escoamento e o coeficiente de reacção na tubagem (considerou-se o valor zero). Os reservatórios são formalmente nós de modelação e os principais parâmetros inseridos nas propriedades do reservatório de nível fixo foram o nível de água e a qualidade inicial para simulações de qualidade da água; os reservatórios de nível variável foram modelados para operar entre as alturas de água mínima (altura mínima da superfície livre acima da cota de fundo) e máxima (altura máxima da superfície livre acima da cota de fundo). As bombas caracterizaram-se por ID da bomba, nó inicial, nó final e potência. As válvulas são troços especiais de comprimento nulo, em que o nó inicial e o nó final consistem na identificação do nó de entrada e saída do escoamento na válvula, respectivamente; na modelação foi inserido o diâmetro da válvula;
- 7) Descrição das condições de operacionalidade do sistema: os dados sobre o funcionamento operacional descrevem o modo como o sistema é operado para os vários cenários de funcionamento, e traduzem-se na especificação de níveis-limite de operação nos reservatórios, no escalonamento temporal do arranque e paragem de bombas, abertura, fechamento e regulação de válvulas;
- 8) Selecção de um conjunto de opções de simulação: hidráulica, qualidade da água, reacção, tempo ou energia;
- 9) Execução de uma simulação hidráulica ou de qualidade da água;

10) Visualização dos resultados da simulação.

4. METODOLOGIA PARA DETERMINAR OS CAUDAIS A FORNECER PELA REDE

4.1 Quantificação de caudais e consumos num sistema de abastecimento

As solicitações a um sistema de abastecimento de água são os consumos de água por parte dos diversos grupos de utilizadores e as perdas físicas de água que ocorrem no conjunto de condutas e restantes componentes. A sua estimativa constitui a tarefa mais difícil e habitualmente mais trabalhosa do processo de desenvolvimento de um modelo de simulação, uma vez que os consumos humanos têm um comportamento de natureza estocástica, tanto no tempo como no espaço, e são invariavelmente a maior fonte de incerteza associada ao modelo.

O consumo de água numa rede de distribuição inclui o consumo humano – doméstico, comercial, industrial, as utilizações públicas de água para rega de espaços verdes ou lavagem de ruas, e as restantes utilizações autorizadas, bem como eventuais utilizações não autorizadas – e as perdas de água devidas a fugas, roturas e extravasamentos.

Assim, assume particular importância o cuidado posto na obtenção das estimativas de consumo, e a adopção de métodos de quantificação e atribuição de consumos aos nós da rede que facilitem a sua actualização permanente e flexibilizem o cálculo e a utilização do modelo.

Na realidade, a medição fiável dos principais volumes de água geridos deverá constituir uma parte integrante das funções de abastecer e distribuir água, não só para efeitos de modelação, mas sobretudo pelo incremento das capacidades de análise e gestão da oferta e da procura, incluindo a avaliação de perdas.

A medição dos caudais captados, produzidos, aduzidos e armazenados (incluindo os importados e exportados) pelo sistema, bem como dos caudais entrados ou saídos em cada sector de distribuição ou zona de medição e controlo é essencial para o cálculo adequado dos balanços hídricos.

Embora a principal finalidade da medição doméstica seja a facturação dos caudais vendidos, a exactidão das medidas e a eficácia do sistema de leitura são igualmente de importância crucial para o cálculo dos balanços hídricos.

Um primeiro indicador importante é o consumo médio global. Existem várias formas de o determinar, das quais se referem como mais comuns as seguintes:

- por macro-medição, ou medição directa dos volumes de água fornecida à rede através de grupos elevatórios, reservatórios e/ou condutas adutoras;
- por micro-medição, ou medição dos volumes de água utilizados nos pontos de consumo;
- por estimação, com base no tipo de ocupação urbanística, no número de habitantes servidos, nas indústrias abastecidas, no estado de conservação da rede, etc..

As duas primeiras formas são complementares e não alternativas, dado que só através da comparação entre os valores obtidos pela macro-medição e pela micro-medição é possível contabilizar as perdas do sistema de distribuição (perdas físicas e consumos não medidos), e actuar em conformidade.

Por norma, os registos de micro-consumo são insuficientemente consistentes para se poderem tirar conclusões à escala do mês, por diversos motivos: leituras efectuadas em datas diferentes consoante a área de leitura, avarias dos contadores, consumos estimados por impossibilidade de leitura, entre outros. No entanto, os registos de micro-consumo permitem determinar, com rigor suficiente, consumos médios semestrais ou anuais medidos, para a totalidade da rede.

No caso, ainda relativamente frequente, da falta de dados de confiança, é necessário recorrer à estimação através da capitação que pode ser definida por:

- razão entre o consumo doméstico médio diário medido e o número de habitantes;
- razão entre o consumo total médio diário medido (incluindo todos os tipos de consumidor) e o número de habitantes;
- razão entre o volume médio de água fornecido diariamente à rede e o número de habitantes (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.2 Sistemas de facturação e gestão de clientes

Um grande número de entidades gestoras em Portugal e noutros países utiliza sistemas informatizados para gestão de clientes e registo e facturação de consumos de água. Estes sistemas registam e gerem toda a informação relevante relativa aos clientes e aos locais de consumo de água do sistema de abastecimento.

Nas implementações mais comuns, os dados que caracterizam o ponto de consumo dividem-se genericamente nos seguintes grupos: identificação do cliente, dados geográficos, dados de leitura e dados de facturação.

A entidade gestora acede à base de dados através de uma aplicação que permite consultar os dados individuais e de facturação dos consumidores ou dos locais de consumo, e os totais de consumo por área de leitura ou por tipo de consumidor (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.3 Concentração de consumos nos nós

Embora, do ponto de vista da rede, os consumos estejam distribuídos ao longo das condutas, através dos ramais de entrega, e seja igualmente expectável que as fugas se distribuam de forma aproximadamente contínua, os modelos de simulação empregam habitualmente a simplificação justificável de representar o consumo como estando concentrado nos nós que delimitam as condutas. Foi convencionado que os consumos que ocorrem em cada semi-comprimento de uma conduta são concentrados no nó respectivo (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.4 Efeitos da simplificação

A simplificação adoptada tem como consequência que a perda de carga calculada ao longo de um troço de conduta pode ser subestimada ou sobrestimada (dependendo do sentido do escoamento), por ser calculada com um caudal respectivamente inferior ou superior ao que efectivamente circula na conduta.

Esse efeito é tanto maior quanto mais a distribuição de consumos ao longo da conduta se afastar de uma distribuição uniforme. Todavia, esse erro não é por norma significativo, a não ser que se dê efectivamente uma distribuição muito desigual, ou que exista um ou mais grandes consumidores (ou grandes concentrações de consumo). Nestes casos, a solução passa pela introdução de nós adicionais (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.5 Caudal de perdas

Nos sistemas de distribuição urbana comuns, com uma densidade de ramais domiciliários média a elevada, a hipótese simplificativa de considerar a distribuição espacial das perdas proporcional à dos consumos é aceitável, pelas seguintes razões:

- é geralmente aceite que a maior parte das perdas físicas num sistema de distribuição urbano ocorre através dos acessórios dos ramais de ligação;
- se for admitido que quanto maior for o consumo, maior será a extensão e número de acessórios dos ramais, a proporcionalidade directa entre o consumo e as perdas é uma suposição razoável (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.6 Consumo-base

A forma habitual de especificar os consumos num modelo de simulação consiste em atribuir a cada nó um valor nominal, também designado por consumo-base.

O consumo-base representa o consumo acumulado no nó.

O consumo-base concentrado no nó pode ser especificado em termos de:

- (i) um valor dimensional, ou seja uma estimativa (em unidades de caudal), para o período em análise, do valor médio do consumo para o conjunto de consumidores cujo consumo é representado pelo nó. A soma de todos estes valores é o consumo médio total da rede;
- (ii) um valor adimensional, expresso como fracção do caudal total entrado na rede, que é obtida dividindo o valor referido em (i) pelo consumo total da rede, para o período em análise. A soma de todas estas fracções é a unidade (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.7 Factor multiplicativo do consumo

No caso de uma simulação estática, a introdução dos consumos-base na modalidade (i) configura completamente o modelo em termos de consumo. Na modalidade (ii), será ainda necessário conferir escala aos pesos que traduzem o consumo-base nos nós, por via de um factor multiplicativo global.

Os modelos de simulação permitem habitualmente configurar um factor multiplicativo do consumo, que possibilita ajustar em bloco todos ou alguns dos consumos-base nodais. No caso (i), esse factor só seria necessário se se pretendesse corrigir os valores introduzidos, ou aplicar-lhes um factor de ponta.

Por exemplo, se o consumo-base representasse um valor médio diário, poderia utilizar-se o factor multiplicativo para obter a descrição dos consumos na situação de ponta diária. O mesmo se poderia passar em termos de consumos médios/máximos semanais, mensais, anuais ou numa situação projectada no futuro.

No caso (ii), de o consumo ser configurado através de fracções da unidade (pesos), traduzindo assim apenas uma distribuição espacial do caudal total entrado no sistema, o factor multiplicativo do consumo é, em simulação estática, utilizado para conferir escala, multiplicando cada fracção nodal pelo caudal total entrado.

Neste caso, pode ainda utilizar-se o factor multiplicativo para operar as mesmas modificações referidas para o caso (i), especificando um valor que é o produto do caudal total entrado pelo factor de ponta ou pela correcção pretendidos (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.8 Consumos compostos – as categorias de consumo

Os actuais simuladores permitem especificar, em cada nó, várias categorias de consumo, que são cumulativas entre si – o consumo total em cada nó é a soma do consumo especificado para as diferentes categorias, multiplicado pelo factor multiplicativo dos consumos (cujo valor por defeito é 1). A maioria dos simuladores permite inclusivamente especificar um factor multiplicativo dos consumos para cada categoria.

Quando é especificada mais do que uma categoria de consumo em um ou mais nós, diz-se que esses nós possuem consumos compostos.

Através das categorias de consumo é possível, por exemplo, separar o consumo doméstico, comercial, industrial ou de serviços, individualizar um grande consumidor do restante consumo associado ao nó, distinguir o consumo facturado do consumo medido não facturado, ou tratar de forma independente as estimativas de perdas.

As diferentes categorias podem assim ser individualmente ajustadas, em função dos objectivos e condicionantes das estimativas correspondentes (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.9 Padrões temporais de consumo – simulação dinâmica

No caso de se pretender simular um cenário em que o consumo varia ao longo do tempo, utiliza-se a simulação em período alargado, também designada por simulação dinâmica.

Com a vulgarização das capacidades de simulação em período alargado, por um lado, e com a tónica actual frequentemente colocada em objectivos de modelação só atingíveis com esse tipo de simulação – como sejam a simulação de qualidade da água, a optimização de bombeamentos ou o controlo operacional – este tipo de simulação é hoje em dia tão ou mais utilizado do que a simulação estática.

O consumo humano de água é por natureza estocástico e muito variável no tempo. A forma de incorporar essas variações temporais consiste em introduzir padrões de variação do consumo, que não são mais do que sequências de factores multiplicativos, um por cada intervalo temporal da simulação hidráulica. Diferentes padrões de consumo traduzirão, desta forma, diferentes comportamentos.

Assim, o consumo em cada nó, para determinado intervalo temporal, é dado pelo produto do consumo-base no nó pelo valor do padrão de consumo escolhido, para o intervalo temporal em causa.

No caso de existirem várias categorias de consumo, haverá um padrão de consumo por cada categoria (embora o mesmo padrão possa ser utilizado por mais do que uma categoria). É na simulação em período alargado, com a utilização de padrões de consumo diferenciados, que a manipulação de categorias de consumo revela a sua potencialidade e flexibilidade para a representação de comportamentos de consumo sobrepostos.

Assume-se habitualmente que a distribuição espacial, para o cenário modelado, é fixa – ou seja, estimada uma distribuição espacial de consumos nos nós, esta mantém-se constante (em termos relativos através da rede) ao longo de toda a simulação, sendo as variações no tempo apenas consequência da multiplicação dos consumos nos nós pelo(s) padrão(ões) de variação no tempo.

Esta forma de carregar consumos nos nós e atribuir a variação temporal a um ou mais padrões pode ser aplicada de duas formas, equivalentes entre si do ponto de vista do cálculo hidráulico, e correspondentes às duas formas de especificar o consumo-base descritas anteriormente:

- (i) atribuir a cada nó o consumo-base dimensional, e utilizar padrões de consumo adimensionais, ou seja, cuja média é a unidade (apenas traduz a variação, sem escala); ou
- (ii) atribuir a cada nó um consumo-base adimensional (peso), e utilizar padrões de consumo dimensionais, que poderão até ser os próprios registos de caudal entrado na rede.

No primeiro caso, a atribuição de consumos dimensionais aos nós permite uma leitura física directa da magnitude desses valores, sendo os padrões de consumo utilizados para traduzir apenas os comportamentos.

O segundo caso permite utilizar os registos de caudal obtidos por medição à entrada da rede directamente como padrões de consumo, e simular assim com facilidade qualquer cenário real verificado, sem precisar de alterar os consumos-base (partindo do princípio que a sua distribuição espacial se manteria válida para os diferentes padrões introduzidos) (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.10 Grandes consumidores

Um grande consumidor, do ponto de vista hidráulico, é um local de consumo onde se verifica pelo menos uma das seguintes condições:

- (i) o consumo médio é suficientemente grande, por comparação com o caudal que circula na conduta a que está ligado, para a sua localização ao longo da conduta poder influenciar a perda de carga que nela se verifica; e/ou
- (ii) o comportamento ao longo do tempo é suficientemente diferenciado dos que o rodeiam, para em certas horas do dia representar caudais significativamente diferentes e assim causar o mesmo efeito (influenciar a perda de carga ao longo da conduta).

Se o seu comportamento expectável – traduzido por um padrão de consumo próprio – é diferente dos que o rodeiam fisicamente, então deve ser considerado à parte, sobretudo se o seu caudal médio não é desprezável.

Deve notar-se que a decisão não deve ser tomada apenas com base na análise dos caudais médios mensais (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.11 Aspectos ligados à representação determinística do consumo

É muito menor a probabilidade de o caudal que verdadeiramente ocorre em qualquer momento, num destes troços de menor consumo, se aproximar da respectiva média. Quanto menor o consumo, menos fiabilidade intrínseca têm os valores de caudal modelados, por representarem médias.

Isto deve-se exclusivamente à natureza dos consumos em si: o consumo agregado de um determinado grupo de consumidores não é mais do que a soma de um número maior ou menor de utilizações individuais, como a abertura de uma torneira, o accionamento de um autoclismo ou o ciclo de uma máquina de lavar. Quanto menor o grupo de consumidores representados por determinado nó de consumo, menos provável é que o respectivo consumo total, num determinado instante, seja representado pela respectiva média no intervalo temporal de referência.

É particularmente importante manter presente esta simplificação no desenvolvimento de modelos para simulação de parâmetros de qualidade da água, uma vez que, este tipo de modelos deve procurar considerar todas as condutas da rede. A tolerância a conferir aos resultados obtidos para extremos de rede com consumos agregados muito baixos deve claramente ser alargada, não devendo ser criada a expectativa de que o modelo pode devolver uma grande precisão nessas zonas (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.12 Métodos baseados nos dados de facturação

Os objectivos primordiais das estratégias de distribuição espacial dos consumos baseadas nos dados de facturação são:

- procurar aproveitar a informação contida nos registos de leitura dos consumidores; e
- explorar as possibilidades efectivas de automatização, no sentido de aligeirar e tornar eficazes os mecanismos de actualização da estimativa (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.13 Área de leitura

Uma das unidades espaciais para as quais é mais simples obter totais de consumo, a partir da base de dados de consumos, é a área de leitura (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Esta solução implicou a criação de uma tabela de correspondência que relacionou cada nó do modelo com a(s) área(s) de leitura que coincidiram com e intersectaram a sua área de influência, bem como as respectivas percentagens de coincidência.

4.14 Número de polícia

O número de polícia (incluindo o duplicador) é o número que identifica a porta principal de uma casa, de um edifício ou de um bloco de apartamentos e tem uma correspondência física com o ramal domiciliário, na maioria das situações. A utilização deste registo implica a criação de uma tabela de correspondência entre cada nó e os números de polícia e códigos de rua que representam o consumo associado a esse nó (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.15 Código de ramal

Esta solução passa pela utilização de um código de ramal, seja a partir de um código pré-existente na EG e no sistema de clientes, seja criando um especificamente para o efeito. Existem por norma campos livres na base de dados de clientes para o carregamento de códigos adicionais. É comum existirem campos livres no registo do local de consumo, que poderão ser utilizados para este fim.

O código de ramal apresenta uma correspondência ideal com a noção de consumo pontual (tal como no caso do n.º de polícia), que se pretende modelar. Tem ainda o benefício de permitir um desejável registo dos ramais existentes, com vantagens cadastrais e de manutenção da rede (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.16 Análise de dados de caudal – como estimar e representar o comportamento dos caudais medidos na rede

A análise de caudais tem como objectivo principal a produção de séries temporais de caudais médios diários, para estudo das principais tendências sazonais, e de caudais médios em base temporal mais curta (horária ou inferior) para produção e tipificação de padrões de consumo diário. A análise de caudais e padrões de consumo apoia a construção dos modelos na tipificação de cenários e na definição de condições operacionais (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.17 Tratamento de séries temporais de caudal

Os consumos globais de cada sector da rede, para um determinado cenário de funcionamento, são determinados através do processamento dos registos contínuos de caudal que deverão estar disponíveis, seja através do sistema de telegestão, seja localmente, em contínuo ou como resultado de campanhas de monitorização temporárias. É frequente ser necessário recorrer também às variações de nível nos reservatórios, em instalações onde não haja medição de caudal de saída, para calcular este último por diferenciação com o caudal de entrada, obtido a partir de medidores ou outras estimativas a montante.

O objectivo do processamento é a produção de séries normalizadas de caudais médios diários, bem como de caudais médios em base temporal mais curta, a partir dos registos contínuos de caudal. Por base temporal mais curta entende-se uma base temporal de detalhe, suficiente para as aplicações de modelação – é comum utilizar-se um passo temporal da ordem dos 5, 10 ou 15 minutos, embora em certos casos se use com eficácia adequada o intervalo horário, por não ser possível obter informação de maior detalhe a partir dos registos originais.

Para que seja possível estimar os consumos globais na rede, para um determinado cenário de funcionamento, é necessário dispor-se de um conjunto de registos temporais de caudais e níveis representativos do funcionamento da rede e de informação sobre todos os volumes fornecidos à rede.

A produção de padrões diários de consumo necessita de séries de registos com a duração mínima de 10 a 15 dias do tipo daquele que se pretende tipificar. Ou seja, para produzir um padrão diário de consumo em dia útil, poderá bastar um registo de 2 a 3 semanas, ou seja, 10 a 15 ocorrências de um dia útil; para produzir um padrão típico de um domingo, com a significância desejável, serão necessárias 10 semanas de registo (10 domingos). As estimativas pressupõem que a série de caudais médios diários apresenta alguma estabilidade, ou seja, que não é afectada por tendências sazonais (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.18 Determinação de padrões de consumo

O conceito básico resume-se a uma curva que une pontos representativos do valor médio do consumo em sucessivos momentos ao longo do dia. Tais médias são calculadas sobre um trecho do registo que se considere representativo para o fim em vista, salientando-se que as variações sazonais, por exemplo, podem influenciar grandemente o andamento da curva.

Naturalmente que, se o efeito sazonal for muito pronunciado, se deverá aplicar este método a trechos de registo relativamente homogêneos desse ponto de vista, devendo-se, como é o caso, dividir o ano nas principais épocas.

A determinação de padrões diários adimensionais de consumo permite separar o comportamento temporal dos consumos da escala de caudais a que ocorrem. O facto de os padrões serem adimensionalizados permite a comparação directa dos dias da semana entre si para a mesma época, e entre épocas do ano diferentes ou de ano para ano. Tipicamente, as maiores diferenças serão encontradas entre os dias úteis, os sábados e os domingos (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.19 Cenários a modelar

Os sistemas de distribuição de água enfrentam uma variabilidade de condições de operação que são essencialmente consequência da natureza estocástica dos consumos (as solicitações), das disponibilidades de água na produção, das capacidades de armazenamento nos locais estratégicos da rede e de condicionalismos de funcionamento da própria rede.

Apesar de toda esta variabilidade, verifica-se que é habitualmente possível isolar um número de cenários de operação que reflectem efeitos de sazonalidade, à escala de meses, e variações ligadas às diferenças entre dias úteis e dias de descanso, à escala semanal e diária.

A análise de caudais diários e instantâneos, por um lado, e a experiência operacional dos operadores, por outro, permitem caracterizar de forma suficientemente individualizada os principais efeitos sazonais durante o ano – como sejam as diferenças Verão/Inverno, ou eventuais comportamentos típicos de certas épocas festivas e férias escolares (por exemplo, Natal, Carnaval e Páscoa). Permitem ainda caracterizar os comportamentos mais típicos entre os diagramas diários de consumo, sendo comum a individualização dos dias úteis, sábados e domingos ou feriados (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

4.20 Dados do controlo operacional

O controlo operacional da rede é exercido através do conjunto de accionamentos automáticos ou manuais de válvulas e estações elevatórias ou sobrepessoras, de modo a ajustar a configuração do sistema às necessidades operacionais de cada instante.

Os controlos podem incidir sobre o estado das condutas, bombas ou válvulas, e são normalmente accionados em função do instante do tempo (i.e., instante do dia, dia da semana, época do ano), da altura de água num reservatório e da variação de caudal ou pressão em determinados pontos da rede (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Os **controlos simples** alteram o estado ou as propriedades de um troço com base na altura de água num reservatório de nível variável, na pressão num nó, no instante de simulação e no instante do dia.

Os **controlos com condições múltiplas** permitem que o estado e as propriedades dos troços dependam da combinação de um conjunto de condições que podem ocorrer na rede, após o cálculo das condições hidráulicas iniciais.

Controlos das condutas - O isolamento de uma conduta é feito através do fecho de válvulas de seccionamento de extremidade. Se uma válvula de seccionamento se encontra parcialmente aberta, funcionando deste modo como uma válvula reguladora, deve ser modelada como uma válvula de controlo (i.e., válvula reguladora de caudal ou de pressão) e o controlo operacional de regulação é aplicado a essa válvula.

Controlos de bombas - As bombas podem estar ligadas ou desligadas, em função do modo como a rede é operada. Tipicamente, as bombas operam em função de factores como a altura de água nos reservatórios e o instante do dia ou de simulação.

Controlos de válvulas - As válvulas de controlo podem estar abertas ou fechadas ou activas. No caso de estarem reguladas (i.e., activas) o valor do parâmetro a regular pode ser alterado, de forma a controlar a grandeza em causa (caudal, pressão ou perda de carga), num determinado ponto da rede e num dado instante da simulação.

4.21 Monitorização

A existência de equipamento de medição para registo de pressão e caudal em locais específicos da rede é fundamental para a quantificação dos consumos totais abastecidos a cada sector, para a tipificação dos padrões de consumo da rede, para análise de controlo de perdas e para a calibração de modelos hidráulicos (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

De um modo geral, cada sector ou sub-sector de uma rede de distribuição ou adução deverá no mínimo possibilitar a monitorização do caudal total consumido. Para os sistemas de adução, cada ponto de entrega deverá ser individualmente medido. Tal significa que devem ser criadas condições para que todas as entradas de caudal no sector e todos os pontos de transferência para outros sectores ou redes possam ser monitorizados.

Para além dos registos de caudal, os registos de altura de água nos reservatórios podem ser também utilizados de forma indirecta para obter volumes escoados e determinar os padrões de consumo da rede. Na ausência de medidor de caudal, é frequente poder utilizar-se a variação do volume armazenado no reservatório que abastece o sector em causa, num determinado intervalo de tempo, como uma estimativa do caudal fornecido.

A pressão é um dos principais indicadores operacionais no dia-a-dia de um sistema de distribuição, reflectindo-se diariamente na qualidade do serviço prestado ao consumidor. A medição da pressão, particularmente importante para a calibração hidráulica dos modelos, pode ser efectuada em qualquer ponto de acesso ao interior das condutas, desde os hidrantes e bocas de incêndio, bocas de rega e simples torneiras de serviço, até às purgas, tomadas em pressão, estações elevatórias (na conduta de aspiração ou de compressão), reservatórios e válvulas. A pressão é medida através de manómetros, equipamentos portáteis ou fixos, analógicos ou digitais, com leitura instantânea apenas, ou com a capacidade de registo através de datalogger.

A monitorização de parâmetros de qualidade da água foi importante para a calibração dos modelos de qualidade da água e definição de campanhas de amostragem. A monitorização de parâmetros de qualidade da água para efeitos de modelação foi executada por recurso a campanhas temporárias, dirigidas para a área específica em estudo.

4.22 Equipamento de medição

A utilidade de medidores de caudal, permanentes ou portáteis, transcende em muito o domínio dos modelos de simulação. A eficaz prática do controlo de caudais em redes de distribuição, para controlo de perdas, minimização de gastos energéticos e gestão operacional da rede, depende de uma adequada rede de medição.

Os tipos de medidores geralmente disponíveis no mercado para as gamas de diâmetros habitualmente utilizadas em sistemas de abastecimento de água incluem:

- medidores mecânicos, normalmente tipo turbina ou Woltman, com a possibilidade de ligação a um registador mecânico ou a um gerador de impulsos (utilizaram-se os **medidores mecânicos do tipo Woltman**);
- medidores electromecânicos, em que a rotação de uma turbina é electronicamente convertida para valores analógicos ou de frequência;
- medidores electromagnéticos não-intrusivos, baseados na leitura das variações de um campo electromagnético, produzindo valores analógicos ou de frequência;
- medidores ultrasónicos não-intrusivos, estimando o caudal a partir do tempo de percurso de um sinal ultrasónico emitido transversalmente à conduta, e produzindo valores analógicos ou de frequência;
- medidores de intrusão, electromecânicos ou electromagnéticos, montados na extremidade de uma haste que é inserida na conduta através de uma tomada em carga.

No caso dos sistemas de adução, a medição de pressões é menos exigente, pois os sistemas são topologicamente mais simples e estão frequentemente já dotados de manómetros em pontos-chave, podendo os níveis nos reservatórios ser igualmente utilizados para esse fim. Assim, não são habitualmente necessários medidores de pressão, sendo preferível uma avaliação caso a caso em função das disponibilidades de medição e das exigências do modelo.

A previsão de necessidades de equipamento de medição de qualidade da água deverá ser efectuada quando forem definidos os objectivos da análise (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006). Em todo o caso, o estudo de parâmetros como o cloro residual e o alumínio poderá ser efectuado com recurso a um conjunto de medidores portáteis do tipo kit, cuja aquisição foi articulada com a programação da amostragem já regularmente efectuada para efeitos de verificação na entidade gestora.

5. CALIBRAÇÃO E UTILIZAÇÃO DOS MODELOS PARA A REDE EM ESTUDO

5.1 Aspectos gerais

Quando o modelo incide sobre um sistema existente, está ao alcance do analista um processo de aferição dos resultados obtidos de forma a:

- (i) aproximá-los na medida do possível da realidade, e
- (ii) determinar até que ponto tal é conseguido.

Assim, e de forma geral, entende-se por calibração de um modelo de qualquer sistema físico o processo de aferição e validação do modelo para diversas condições de funcionamento criteriosamente seleccionadas, de modo a permitir que a sua utilização possa ser feita com confiança suficiente no âmbito da análise pretendida.

A calibração é feita com base na comparação entre resultados do modelo e resultados de medições realizadas no sistema físico.

Partindo do princípio de que não é viável medir e registar essas grandezas em todos os pontos de interesse e em todos os momentos de interesse – caso contrário a utilidade do modelo seria questionável, pelo menos na gestão corrente do sistema – tentar-se-á obter tantas observações quanto possível, e basear a explicação da incerteza remanescente em estimativas razoáveis.

As principais grandezas que reflectem o comportamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água em pressão são o caudal (o que entra ou sai do sistema e o que circula na rede) e a pressão (ou o nível nos reservatórios).

Como foi visto anteriormente, o comportamento de parâmetros de qualidade da água em sistemas de abastecimento de água depende, primeiramente e de forma incontornável, do transporte ao longo dos troços e da mistura nos nós de junção, o que é essencialmente determinado pelo comportamento hidráulico do sistema. A esses efeitos, os modelos actuais adicionam a representação da transformação de parâmetros não-conservativos, para cuja aferição é necessário efectuar medições específicas das respectivas concentrações. Assim, a dependência deste tipo de modelação de uma sólida representação do comportamento hidráulico reforça a importância do caudal (ou velocidade) e da pressão como principais grandezas a monitorizar para efeitos de modelação.

As principais motivações para a recolha de medições de caudal (incluindo medições de consumo) e pressão no âmbito de um processo de modelação, são:

- (i) a estimativa das solicitações e das condições de fronteira do sistema, e
- (ii) a acumulação de valores característicos do comportamento real do sistema, com os quais os resultados do modelo possam ser comparados e os seus parâmetros aferidos.

No âmbito mais geral da gestão técnica de um sistema, a monitorização das principais grandezas é sobretudo motivada pela necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o seu comportamento e desempenho.

De forma geral, segundo Coelho, Loureiro e Alegre (2006), a fase de calibração permite cumprir os seguintes objectivos:

- (i) Ajustar o modelo às condições do caso de estudo;
- (ii) Adquirir ou aprofundar o conhecimento sobre o funcionamento do sistema, a sua operação e o seu desempenho;

(iii) Descobrir e eliminar erros nos dados ou falhas no conhecimento do sistema.

5.1.1 Fontes de erro na modelação

As discrepâncias entre os resultados do modelo e a realidade observada podem ter múltiplas origens, entre os dados utilizados para descrever o sistema, as suas solicitações e condições de fronteira, e as suas condições operacionais (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

As possíveis origens de erros constituem um potencial parâmetro de calibração e são as seguintes: coeficiente de rugosidade das condutas, atribuição de consumos aos nós, diâmetro nominal e diâmetro interno, registos de cadastro, erros de conectividade, simplificação da rede, níveis e condições de operação de reservatórios e instalações elevatórias.

5.1.2 Distribuição espacial dos consumos

Se o objectivo da análise passar pela simulação de parâmetros de qualidade da água, já é fundamental ter alguma confiança na distribuição espacial de consumos utilizada, pois influenciará directamente os tempos de percurso.

As alterações na distribuição espacial de consumos podem reflectir efeitos mais localizados, sem colocar no entanto em causa o equilíbrio total da rede (para qualquer que seja o instante da simulação, a soma dos consumos nos nós terá sempre de ser igual ao caudal total consumido) (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

5.1.3 Simulação em período alargado

As situações em que é efectivamente necessário introduzir a componente tempo – e portanto calibrar um modelo em período alargado com medições efectuadas ao longo do tempo, de forma específica – prende-se com a necessidade de afinar grandezas cujo cálculo dependa da integração temporal de valores do modelo. Estão nessa categoria os volumes em reservatórios de nível variável (RNV), o tempo de percurso, o rastreio de origens de água e as concentrações de parâmetros de qualidade da água. A calibração destes parâmetros coloca particulares exigências numa eficaz distribuição espacial de consumos, e em diagramas de consumo correctamente especificados (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

5.1.4 Modelos de sistemas de adução

Os sistemas de adução, que transportam a água desde a produção até aos reservatórios para distribuição, possuem características muito próprias que condicionam o seu comportamento hidráulico e, consequentemente, a sua modelação.

Estes sistemas caracterizam-se por:

- topologias relativamente simplificadas;
- condutas de médio e grande diâmetro;
- poucos pontos de consumo, habitualmente bem caracterizados;

- operação frequentemente muito mais complexa do que os sistemas de distribuição comuns, em virtude da interdependência de reservatórios e condutas elevatórias em série.

A exactidão deste tipo de modelos depende sobretudo da qualidade da descrição das configurações e condições de operação, representadas pela altimetria e níveis máximos e mínimos de reservatórios, alturas e caudais de elevação e regulação de válvulas de operação (sobretudo as válvulas reguladoras de caudal e as válvulas reguladoras de pressão) (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

5.2 Procedimento para calibração

5.2.1 Tolerância

O esforço de calibração correcto é essencialmente uma função dos objectivos da análise.

A tolerância a admitir para a diferença entre os valores modelados e os valores medidos de qualquer grandeza não poderá ser inferior à precisão de medição do aparelho com o qual foi efectuada a medição.

- Modelação de um desinfectante residual (p.ex., cloro)
 - O modelo deverá reproduzir o padrão de concentrações do desinfectante residual observado, ao longo do tempo de amostragem, com um erro médio aproximado não superior a 0.1-0.2 mg/l, dependendo da complexidade do sistema (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

5.2.2 Calibração no caso de estudo

A calibração foi feita com base na comparação entre resultados do modelo e resultados de medições realizadas no sistema físico.

A localização e a frequência com que as amostras foram recolhidas são de capital importância para a significância dos resultados e a explicação da incerteza remanescente em estimativas razoáveis.

Os medidores mecânicos do tipo Woltman que medem os caudais de água fornecida à rede são novos, o que dispensa a sua calibração.

5.3 Dependência das condições iniciais

5.3.1 Pressão e caudais

O equilíbrio hidráulico de uma rede de condutas em pressão dá-se de forma quasi-instantânea. Por essa razão, é relativamente seguro tratar a simulação em período alargado como uma sequência de fotografias instantâneas: assim que as solicitações ao sistema – os consumos – mudam para um novo conjunto de valores, o equilíbrio hidráulico pode ser recalculado e, à escala temporal a que o fenómeno é tratado nos modelos de simulação, é instantâneo e praticamente independente das condições hidráulicas representadas pelo

instante anterior. O equilíbrio hidráulico não possui “memória”, entre dois instantes consecutivos da simulação. Tais considerações são válidas para o cálculo do equilíbrio hidráulico, expresso pelas variáveis fundamentais: caudal (velocidade) e altura piezométrica. Quando se pretende estender esse cálculo a variáveis que dependem da integração de valores da velocidade de escoamento relativamente ao tempo, como o transporte, mistura e transformação da concentração de um determinado parâmetro de qualidade da água, então o fenómeno é intrinsecamente dependente do tempo de forma contínua.

Tal consideração é válida, à excepção de 2 tipos de fenómenos que correspondem a condições de fronteira hidráulicas dependentes do tempo:

- a variação de volume armazenado em corpos de água de volume limitado, como os RNV – reservatórios de nível variável;
- o accionamento de certos órgãos hidráulicos – como as bombas e as válvulas – de acordo com regras de controlo hidráulico dependentes do tempo (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

5.3.2 Volume nos reservatórios de nível variável e instalações elevatórias

A existência de um volume de água limitado pelas dimensões de um RNV, e que em cada momento é igual ao volume do momento anterior adicionado do balanço entre o caudal que entra e o caudal que sai do reservatório – balanço esse que pode ser positivo, nulo ou negativo – complica o cálculo do balanço hídrico na rede influenciada por esse reservatório.

Tal deve-se ao facto de esse volume corresponder a determinada altura de água no reservatório, e portanto a determinada condição de fronteira para a altura piezométrica nesse ponto.

Dependente desse valor está toda a superfície piezométrica na vizinhança desse ponto, o que por sua vez condiciona os caudais que circulam, e nomeadamente os caudais que entram e saem do reservatório. Estes, por sua vez, condicionam o volume no reservatório e por consequência a referida condição de fronteira (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

As primeiras 24 horas da simulação são atípicas – reflectem apenas o ajuste entre o estado inicial especificado pelo modelador para os reservatórios, o estado inicial das duas estações elevatórias, os caudais abastecidos e os caudais consumidos.

Esta situação de modelação relativamente simples ilustra a dependência temporal dos reservatórios num processo de simulação em período alargado. Na utilização do modelo para a tomada de decisão deverá ser descartado o período em que o modelo efectua o ajuste inicial.

Os limites de variação do nível e a forma como este varia ao longo do tempo constituem elementos de fácil verificação física (seja através de registos, por observação directa, ou sujeita à sensibilidade dos operadores) que permitem aferir da correcção do modelo.

5.3.3 Dependência temporal

No caso da simulação de parâmetros de qualidade da água, os processos simulados – sobretudo a advecção (transporte) e a transformação de substâncias não-conservativas – são intrinsecamente dependentes do tempo. O seu cálculo é efectuado através da integração no tempo e no espaço de várias das variáveis envolvidas. Tal significa que os resultados traduzem uma sequência em que cada conjunto de valores, para determinado momento no tempo, é directa e estreitamente dependente do momento anterior.

Assim, qualquer simulação de qualidade da água em período alargado deverá correr por um período inicial de estabilização, até ser atingido um ciclo repetível nos valores das concentrações do parâmetro estudado, em toda a rede.

A excepção a este princípio geral é o caso dos modelos que pretendem simular situações operacionais que pela sua própria natureza não resultam num ciclo repetível dos níveis nos reservatórios, do estado de bombas e válvulas, ou dos parâmetros de qualidade da água, incluindo o tempo de percurso (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

5.4 Aplicações

A utilidade dos modelos de qualidade da água dá-se a 2 níveis:

- (i) ao nível mais directo, permitem o cálculo da propagação de concentrações de parâmetros de qualidade, bem como do tempo de percurso e do rastreio da água proveniente de origens específicas;
- (ii) de forma indirecta, contribuem para a qualidade dos modelos hidráulicos sobre os quais se baseiam, tanto pela exigência adicional que sobre eles colocam, como pelos meios adicionais de aferição dos resultados que possibilitam.

Tal como os modelos hidráulicos, também os modelos de qualidade da água podem ser utilizados para:

- simulação, em que servem essencialmente para descrever os processos que ocorrem nos sistemas – funcionam como um complemento da monitorização (por amostragem ou outra), para dela inferir mais informação, de forma dirigida;
- optimização de processos, na procura de uma solução ideal para um problema de dimensionamento ou operação.

Alguns exemplos específicos da utilização de modelos de qualidade da água incluem:

- Planeamento de programas de amostragem;
- Optimização do processo de desinfecção;
- Localização de estações de re-cloragem;
- Previsão dos efeitos do armazenamento;
- Minimização de tempos de percurso;
- Previsão da propagação de contaminantes e estabelecimento de estratégias de lavagem (flushing) de condutas;
- Controlo das percentagens de água a misturar em sistemas com origens de águas diferentes;
- Previsão de potenciais problemas de degradação de qualidade;
- Comparação de estratégias operacionais (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Com a actual ênfase nos requisitos de qualidade da água, os quadros regulamentares cada vez mais exigentes, os crescentes custos de tratamento e manutenção de qualidade da água, e a visibilidade dos problemas de qualidade da água junto dos consumidores e agentes sociais, a modelação de qualidade da água deverá progressivamente desempenhar um papel central no planeamento, projecto e controlo operacional de sistemas de distribuição.

5.4.1 Aplicabilidade e restrições

A experiência demonstra claramente que a sua eficácia depende de serem verificadas as seguintes condições fundamentais:

- (i) O modelo deverá ser completo, ou seja, deverá incluir todas as tubagens através das quais possa ocorrer escoamento no sistema;
- (ii) O modelo hidráulico em que se baseia deverá estar cuidadosamente calibrado, nomeadamente no que diz respeito às perdas de carga unitárias e, de forma crucial, aos consumos a satisfazer;
- (iii) As condições operacionais para as quais se pretende trabalhar deverão estar bem modeladas;
- (iv) No estudo de parâmetros não-conservativos, como o alumínio, as respectivas cinéticas deverão estar bem caracterizadas, em relação às reacções na água a circular no sistema em causa.

Para a correcta aplicação dos resultados da modelação, parte-se assim do princípio que as condições (i) a (iii) serão satisfeitas. Os resultados obtidos através de modelos aproximados ou não calibrados, como é o caso dos utilizados na fase de planeamento/dimensionamento, ou fazendo uso de estimativas de consumo pouco fiáveis, não poderão ter um grau de precisão superior ao dos dados em que se baseiam (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

5.4.2 Tempo de percurso

Uma das variáveis cuja simulação permite inferir informação mais valiosa sobre a qualidade da água de um sistema é, na realidade, uma variável puramente hidráulica: o tempo de percurso (por vezes também designado por tempo de residência no sistema, ou ainda idade da água) (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

O cálculo do tempo de percurso médio de uma molécula de água entre dois pontos (habitualmente, entre a origem de abastecimento e os pontos de consumo) é efectuado por integração dos valores da velocidade, ao longo do tempo e ao longo do(s) percurso(s) entre os dois pontos, assumindo-se a mistura completa nos nós.

O tempo de percurso permite um ganho de sensibilidade muito apreciável ao funcionamento hidráulico de um sistema, incluindo a percepção dos caminhos preferenciais, das zonas de menor movimento ou de estagnação, e das zonas em que poderá ser mais ou menos significativo, por exemplo, colher amostras para controlo de qualidade da água.

5.4.3 Selecção dos locais de amostragem

A colheita de amostras para determinação de parâmetros de qualidade da água nos sistemas pode normalmente servir dois objectivos:

- (i) o controlo de qualidade do processo de transportar e distribuir água potável; e
- (ii) a verificação de conformidade legal, no ponto de consumo.

O primeiro objectivo é um dos principais vectores da gestão técnica da própria entidade gestora, enquanto que o segundo é essencialmente um mecanismo externamente imposto para defesa do consumidor e da saúde pública. É frequente o primeiro implicar uma amostragem mais detalhada do que o segundo, e portanto, incluí-lo como subconjunto do seu universo.

Em qualquer dos casos, a localização e a frequência com que as amostras são recolhidas são de capital importância para a significância dos resultados (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

5.5 Metodologia para modelação do comportamento do alumínio em sistemas de distribuição

Descreve-se seguidamente a metodologia geral (consultar Vieira e Coelho, 2000 e Vieira, 2001) para a abordagem à modelação de alumínio e tempo de percurso, em sistemas de transporte e distribuição de água. A metodologia pressupõe a existência prévia de um modelo hidráulico, adequadamente actualizado e calibrado.

5.5.1 Passos no desenvolvimento de um modelo para simular o comportamento do alumínio

a) Análise das condições de operação e funcionamento do sistema

Esta fase é destinada a um conhecimento da topologia, dos modos de funcionamento do sistema adutor, das condições operacionais e dos principais percursos de caudal. Utiliza-se para tal, informação operacional actualizada para alimentar o modelo e analisar os principais cenários de operação. Procura-se obter estimativas dos tempos de percurso e das gamas de tempos a analisar na determinação das cinéticas de alumínio, bem como identificar os pontos de recolha de amostras e os troços passíveis de serem utilizados na determinação do efeito de libertação na parede. Para esta actividade, é necessária a disponibilização de informação cadastral e operacional, bem como registos de caudal e de alumínio e outra informação relevante.

b) Análise do registo histórico de amostragem de alumínio e outras características relevantes da água

Nesta fase, é levada a cabo uma análise do registo histórico de amostragem de alumínio e outras características relevantes da água, tais como COT (carbono orgânico total), ferro, manganês, amónia e temperatura. A análise, não exaustiva, destina-se fundamentalmente a obter um primeiro levantamento das variáveis a ter em conta, do universo dos pontos de amostragem possíveis e daqueles que serão preferenciais para as determinações a efectuar.

c) Caracterização da cinética de libertação de alumínio no seio da água

A recolha de amostras de água permite a obtenção de dados para a análise da variação de concentração do alumínio.

d) Caracterização da cinética de libertação de alumínio em contacto com o sistema

A determinação da libertação devido às reacções que ocorrem com as paredes dos componentes do sistema pode ser efectuada recorrendo a medições diferenciais na rede.

É necessário identificar o conjunto de características de tubagem (materiais e idades) considerado preponderante no sistema em causa, e seleccionar troços do sistema em que as condições se verifiquem:

- Existência de medição ou estimativa fiável de caudal;
- Existência de pontos de amostragem no início e no fim do troço;
- Ocorrência de tempos de percurso relevantes para a água e material em causa, nomeadamente abrangendo períodos de caudal mínimo (períodos nocturnos).

e) Análise global e estabelecimento de recomendações para a modelação do alumínio

Análise global dos resultados obtidos; selecção e caracterização do melhor modelo cinético para o crescimento do alumínio.

f) Aplicação ao modelo de simulação do sistema e respectiva calibração contra medições de campo

Integração dos resultados de c), d) e e) no modelo de simulação do sistema e análise do modelo de forma a escolher os pontos de calibração de alumínio mais significativos. Na sua selecção devem figurar pontos extremos da rede, mas também pontos nas condutas de maior diâmetro, onde a agregação de consumos confira uma maior fiabilidade aos resultados gerados pelo modelo hidráulico subjacente. Deve observar-se uma tolerância no fecho da calibração não inferior à precisão dos instrumentos de medição utilizados.

Deve procurar-se uma coincidência não só dos valores das concentrações medidas e simuladas, como do seu comportamento ao longo do tempo. Deve atender-se ao facto da libertação do alumínio ser essencialmente lenta, de forma que para tempos de percurso curtos o comportamento deste parâmetro pode aproximar-se do de um traçador quase conservativo. Assim, será conveniente obter em cada ponto de calibração uma sequência de medições cobrindo várias horas. Não é absolutamente necessário que haja simultaneidade nas medições entre os diversos pontos de calibração, mas deverá existir medição contínua de caudal e do alumínio no(s) ponto(s) de entrada na rede durante todo o período em que são feitas medições de calibração, de forma a possibilitar a geração de simulações completas.

5.5.2 Determinação de constantes cinéticas de libertação na água

A velocidade da reacção é proporcional à concentração de alumínio.

Em função dos objectivos pretendidos, podem ser conseguidas estimativas viáveis, recorrendo a medições diferenciais de alumínio na rede, após o conhecimento das características do crescimento no seio da água.

Para o efeito, é necessário identificar troços, entre pontos de amostragem, onde se verifique um tempo de percurso suficiente para permitir identificar o efeito a partir da diferença entre as medições de alumínio nas secções de montante e de jusante. Tal dependerá da magnitude desse efeito, o que variará com o tipo de material e estado da conduta.

Será necessário dispor de medições ou estimativas fiáveis de caudal para esses troços, de forma a permitir calcular o tempo de percurso. Caso não seja possível efectuar medições directas de caudal (recorrendo a medidores fixos ou portáteis) ou recorrer a estimativas baseadas no funcionamento de órgãos hidráulicos (parâmetros de funcionamento de bombas, diferenças de nível em reservatórios), esta fase pode ser realizada com o apoio de um modelo hidráulico bem calibrado. Para tal, é imprescindível escolher troços de conduta correspondentes a uma significativa aglomeração de consumo (nas zonas de montante da rede), em que a respectiva variabilidade tenha um peso menor na precisão dos valores do escoamento modelado (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006). O tempo de percurso constitui uma medida simples, não específica, da qualidade da água entregue para consumo humano. Internamente, o EPANET trata o tempo de percurso como um constituinte reactivo, que segue uma lei cinética de crescimento de ordem zero, com uma taxa constante igual a 1 (i.e., em cada segundo, a água torna-se um segundo mais antiga na rede). Deduzindo a parcela de libertação no seio da água, obter-se-á uma indicação da importância relativa da parcela de libertação devida à interacção com a parede. É previsível que a gama testada esteja limitada pela disponibilidade de pontos de amostragem e de medição de caudal.

5.6 Determinação do coeficiente de rugosidade

A rugosidade das condutas é uma das principais incógnitas, e consequentemente um dos principais factores de incerteza, na construção de um modelo. Para o coeficiente de rugosidade, como primeira aproximação, deve ser adoptado um valor em função das características do material da conduta e do seu provável estado de conservação, e nos termos da fórmula considerada para o cálculo da perda de carga contínua – são oferecidas pelo software várias opções para este efeito, como as fórmulas de Hazen-Williams, de Chezy-Manning ou de Darcy-Weisbach (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Factores como a dimensão, o tipo e a idade da conduta ou a qualidade da água podem influenciar o valor do coeficiente de rugosidade. O recurso a medições na rede, por exemplo através da realização de testes de perda de carga, constitui a melhor forma de aferir os coeficientes de rugosidade adoptados. O **valor do coeficiente de rugosidade** atribuído foi **140** dado que as tubagens são de PVC sem incrustações e **120** para a tubagem 342 que poderá ter incrustações, devido a água medianamente dura, proveniente de outra origem e à idade da tubagem.

O Quadro 5.1 contém uma lista dos principais materiais empregues em condutas de abastecimento de água e respectivos coeficientes de rugosidade que servem apenas como valores indicativos (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Quadro 5.1 – Coeficientes de rugosidade para condutas novas de abastecimento de água.

Material	Hazen-Williams Coeficiente C	Chezy-Manning Coeficiente n	Darcy-Weisbach k (mm)
Materiais cimentícios			
Fibrocimento	140	0.011 – 0.013	0.4 – 1.2
Betão	130	0.011 – 0.013	0.3 – 3.0
Materiais plásticos			
Policloreto de baixa, média ou alta densidade	140 - 150	0.009 – 0.011	1.5×10^{-3}
Policloreto de vinilo	140 - 150	0.009 – 0.011	1.5×10^{-3}
Poliéster reforçado com fibra de vidro	140 - 150	0.009 – 0.011	1.5×10^{-3}
Materiais metálicos			
Ferro fundido não revestido	120 - 130	0.012	0.226
Ferro fundido revestido	130 - 140	0.013	0.102
Aço	140 - 150	0.010 – 0.012	$2.8 \times 10^{-3} - 5.8 \times 10^{-3}$

5.7 Determinação dos consumos

O consumo-base concentrado no nó determinou-se através de valor dimensional, ou seja uma estimativa (em unidades de caudal), para o período em análise, do valor médio do consumo para o conjunto de consumidores cujo consumo é representado pelo nó. A soma de todos estes valores é o consumo médio total da rede. A distribuição espacial dos consumos foi baseada nos dados de facturação em que se aproveitou a informação contida nos registos de leitura dos consumidores.

Durante a modelação, o consumo no nó em cada instante do dia resulta do produto do consumo-base pelo valor do factor multiplicativo do intervalo temporal nesse instante. A atribuição de consumos dimensionais aos nós permite uma leitura física directa da magnitude desses valores, sendo os padrões de consumo adimensionais utilizados para traduzir apenas os comportamentos. O modelo foi desenvolvido para simulação em período alargado, com um único padrão de consumo, por este ser relativamente homogéneo em toda a rede. O intervalo de tempo é de 6 horas e os factores multiplicativos 0.5, 1.3, 1.0 e 1.2.

O consumo médio global foi determinado por medição directa dos caudais de água fornecida à rede através de medidores mecânicos do tipo Woltman.

5.8 Simulação de condições operacionais irregulares

Uma excepção ao princípio geral da procura da estabilização de um comportamento cíclico para análise dos resultados da simulação é o caso em que o sistema e as condições operacionais simuladas não proporcionam uma ciclicidade estável.

Nesse caso, deverá exercer-se o maior cuidado para destrinçar o período em que o modelo inicializa os valores das variáveis de estado dependentes do tempo (níveis de reservatórios, tempo de percurso, parâmetros de qualidade da água), do período em que os resultados são já representativos do cenário simulado. O primeiro cuidado a verificar para o estabelecimento de um modelo de qualidade da água é a duração mínima necessária para a inicialização da rede com valores ciclicamente estáveis da variável simulada, como o caso do tempo de percurso.

Uma outra dificuldade, relacionada com esta, é o facto do mesmo ponto de amostragem poder apresentar uma ciclicidade do tempo de percurso com um período diferente de 24 horas – o que tem como consequência que amostras colhidas nesse ponto, à mesma hora e em dias semelhantes fornecem resultados diferentes, por razões intrinsecamente hidráulicas (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

6. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

6.1 Análise hidráulica

A utilização mais imediata de um modelo, aquela que decorre mais espontaneamente do processo de desenvolvimento, é o aprofundamento do conhecimento sobre o funcionamento do sistema modelado – por outras palavras, o ganho de sensibilidade ao seu comportamento.

A primeira impressão, aquando da análise de um sistema através do seu modelo, decorre da verificação das suas características físicas: topologia (o mapa da rede), diâmetros, materiais e comprimentos das condutas, e altimetria dos respectivos pontos notáveis (nós).

O EPANET 2.0 permite definir categorias com base em quantis da população de valores da variável pretendida, ou ainda com base em intervalos iguais, desde o valor mínimo ao valor máximo presentes.

Tendo obtido informação passível de ser deduzida de uma análise da infra-estrutura física apenas, pode passar-se a executar simulações que permitam ir progressivamente analisando os valores das principais variáveis de estado, e assim ir ganhando sensibilidade ao comportamento da rede (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

O modelo foi desenvolvido para simulação em período alargado, com um único padrão de consumo, por este ser relativamente homogéneo em toda a rede. O **Intervalo de Tempo é de 6 horas** e os **Factores Multiplicativos 0.5, 1.3, 1.0 e 1.2**. O **consumo máximo dá-se por volta das 6 horas** do padrão. Executada a simulação, e começando-se por uma análise de valores do caudal, será natural ir-se investigar os caudais máximos.

O modelo permite a observação da infra-estrutura física: cotas, condutas, diâmetros e a observação de simulações: caudais [máximos, muito baixos (nos extremos de rede) e/ou muito altos (na conduta principal de abastecimento)], perda de carga unitária (sistema com grandes perdas de carga – com estrangulamentos limitativos da sua expansão ou mesmo da operação corrente – ou se pelo contrário tem ainda margem para crescimento dos consumos), perda de carga para a hora de maior consumo, pressão, pressão mínima na hora de maior consumo. Na Figura 6.1 revela-se o balanço de caudal na rede.

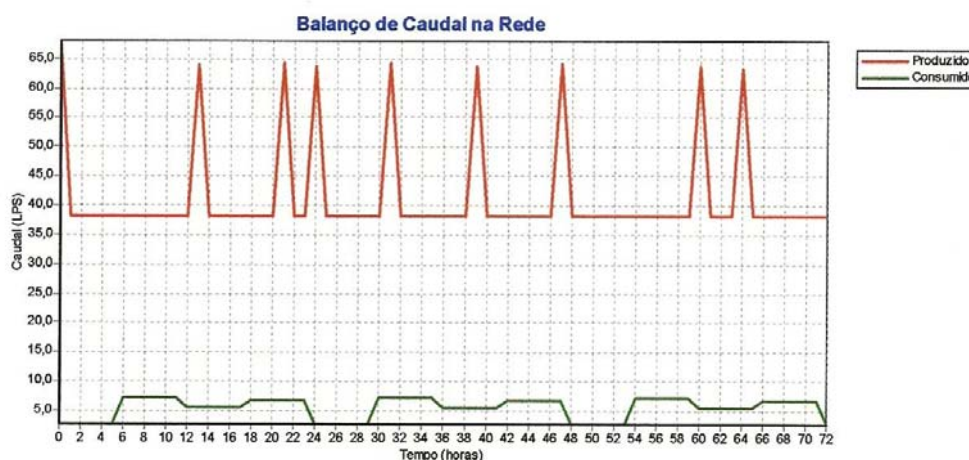


Figura 6.1 – Balanço de Caudal na Rede.

As Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam os resultados das simulações para o período de maior consumo que ocorreu no dia 3 às 7 horas.

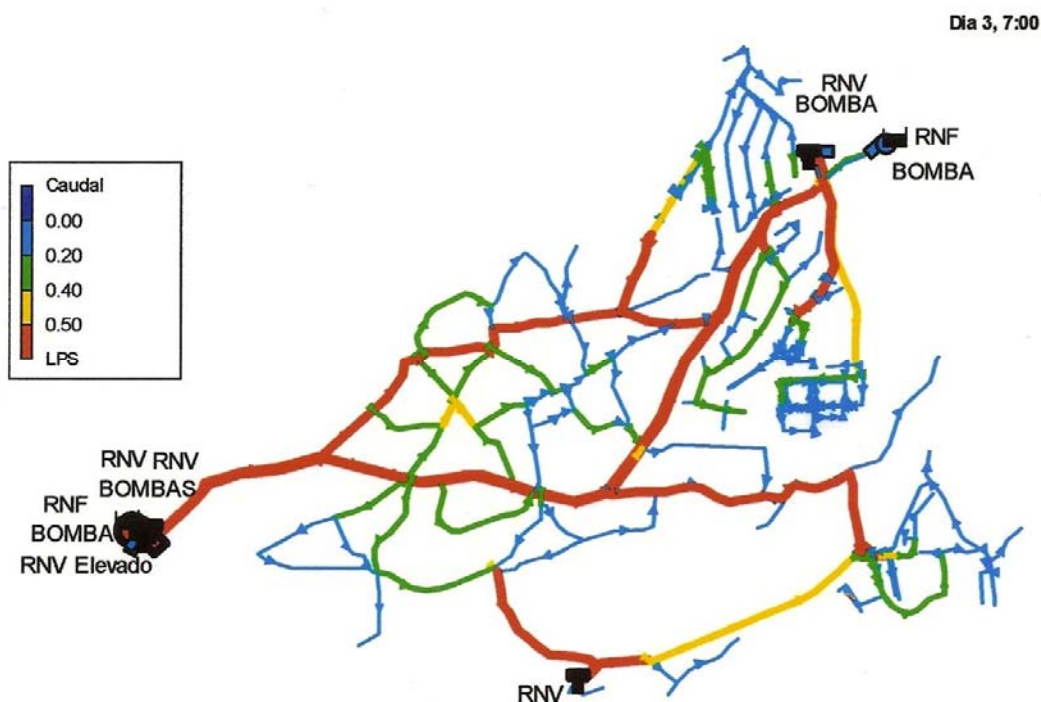


Figura 6.2 – Representação dos caudais nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 7 h), usando uma escala que distingue valores de caudal entre 0.2 e 0.5 l/s.

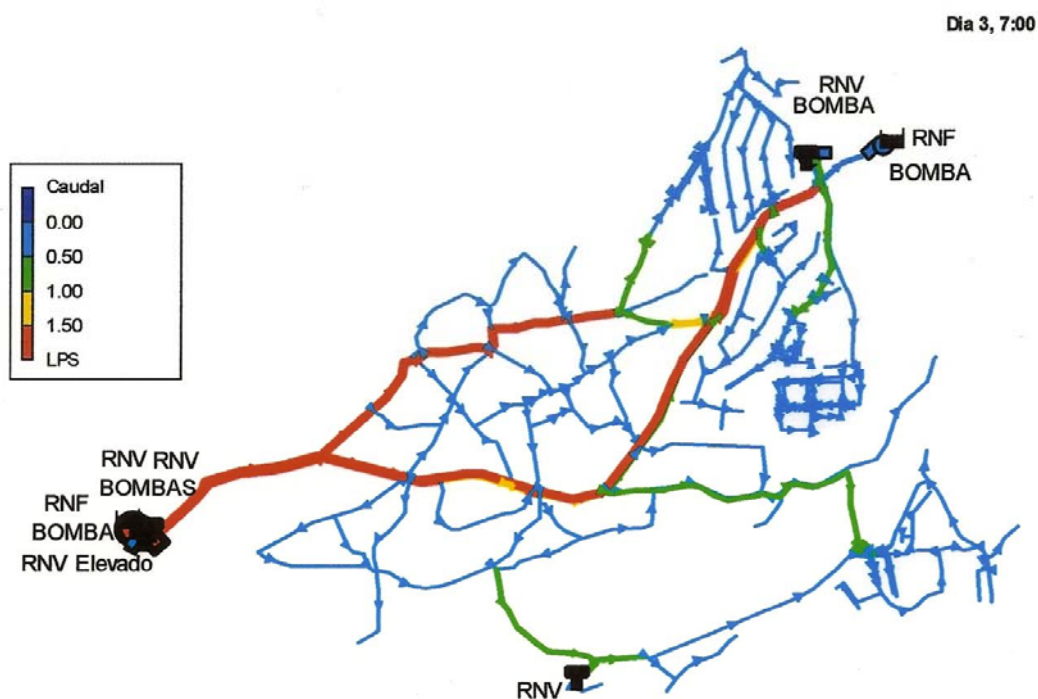


Figura 6.3 – Representação dos caudais nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 7 h), usando uma escala que distingue valores de caudal entre 0.5 e 1.5 l/s.

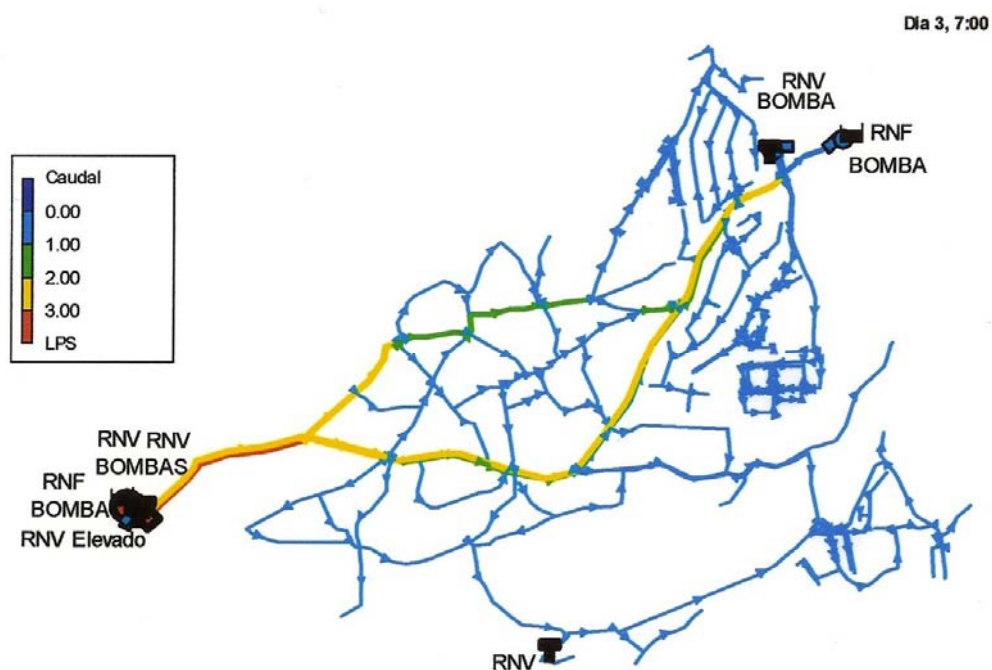


Figura 6.4 – Representação dos caudais nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 7 h), usando uma escala que distingue valores de caudal entre 1 e 3 l/s.

Os **maiores caudais** encontram-se na adutora para os RNV 212 e 213 e na distribuidora à saída do RNV 13 (Figura 6.4). Os **caudais mínimos** encontram-se principalmente nas zonas terminais (Figura 6.5).

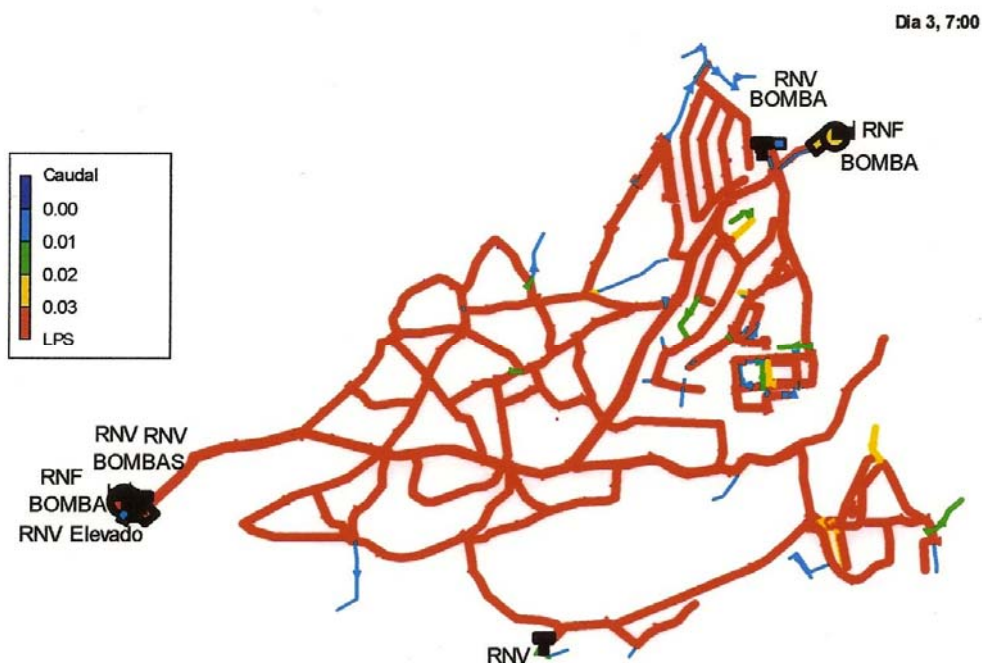


Figura 6.5 – Representação dos caudais nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 7 h), usando uma escala que distingue valores de caudal menores que 0.03 l/s.

A Figura 6.6 representa valores de **perda de carga para o período de maior consumo** considerado, que foi no dia 3 às 9 horas.

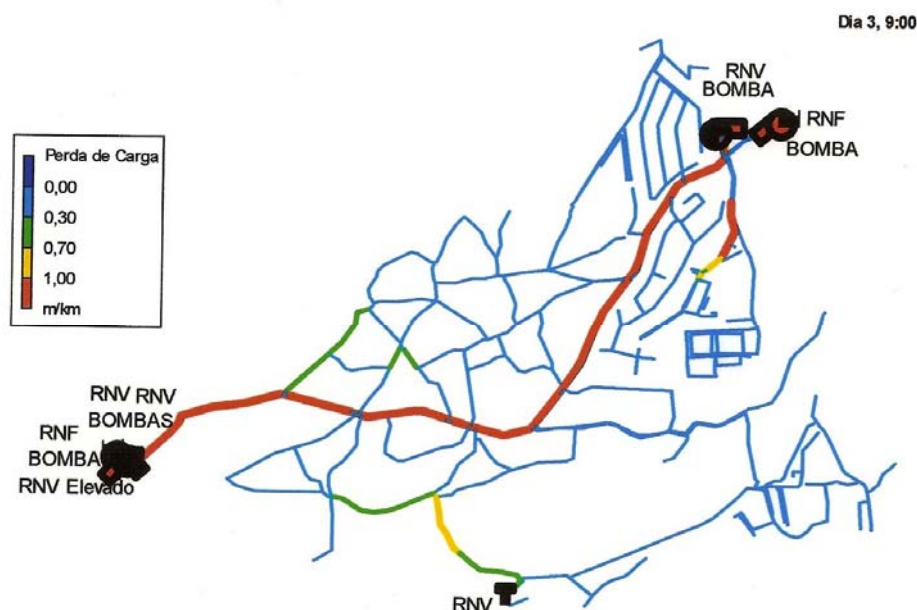


Figura 6.6 – Representação das perdas de carga nas condutas no período de maior consumo (dia 3, às 9 h), usando uma escala que distingue valores de perda de carga entre 0.3 e 1 m/km.

A distribuição de pressão na rede, na hora de maior consumo estudada (dia 3, às 7 horas), é indicada na Figura 6.7, onde se visualizam os valores de pressão mínima.

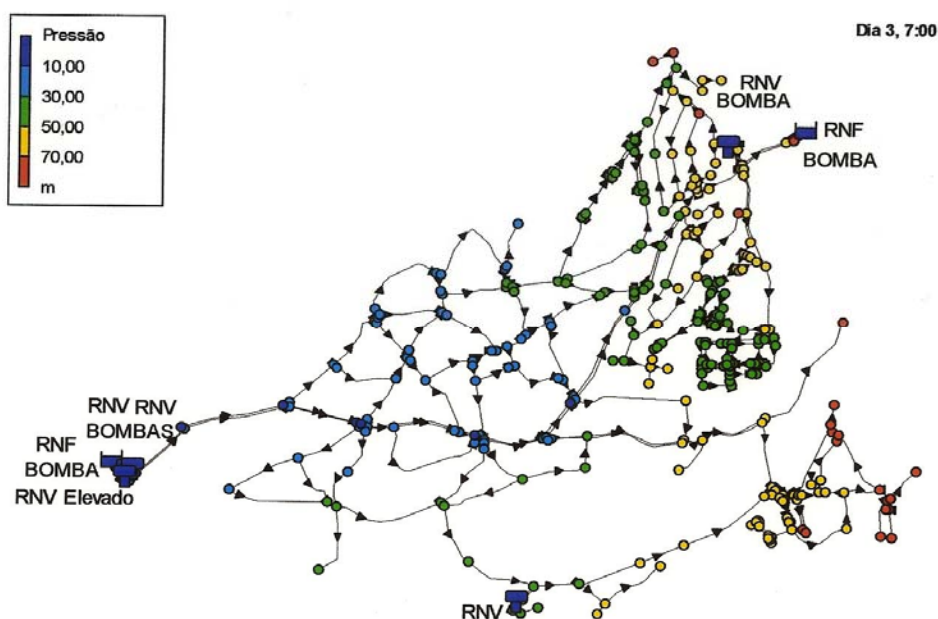


Figura 6.7 – Distribuição de pressão para o período de maior consumo (dia 3, às 7 h).

6.2 Análise do funcionamento de reservatórios e estações elevatórias

Uma das contribuições mais decisivas da modelação de sistemas de abastecimento de água é a possibilidade de compreender o comportamento de reservatórios no seio do sistema, e o seu impacto tanto para o equilíbrio hidráulico deste como para a qualidade da água distribuída (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Da mesma forma, os modelos de simulação permitem reproduzir o comportamento de instalações elevatórias, com regras de operação menos ou mais complexas, dependentes de controlos temporais ou relacionadas com níveis em reservatórios ou com os valores da altura piezométrica em determinados pontos da rede.

A associação de instalações elevatórias e reservatórios é frequente nos sistemas de abastecimento – particularmente nos sistemas de transporte e adução – e origina por vezes comportamentos de maior complexidade do que aquela que é aparente. São justamente o processo do desenvolvimento de um modelo e a tentativa de descrever o fenómeno que permitem uma percepção mais evidente da complexidade do comportamento do sistema.

A rede em estudo é alimentada por duas origens, sendo uma delas utilizada de modo contínuo, a partir de uma captação (furo); a outra origem de água é uma instalação elevatória, utilizada como reforço. A rede alimenta uma zona de consumo residencial, e ainda outros sistemas de distribuição periféricos.

A água proveniente do furo passa por uma estação elevatória, cujo funcionamento é controlado pela altura de água nos RNV. As instalações elevatórias utilizam bombas de velocidade fixa.

O reservatório RNV13 tem assim um papel central no comportamento da rede, controlando os caudais provenientes das diferentes origens.

6.3 Análise de qualidade da água

Os modelos do comportamento de parâmetros de qualidade da água que actualmente integram a generalidade dos programas de simulação – geralmente designados por modelos de qualidade da água – simulam o movimento e transformação de substâncias que possam considerar-se como estando em solução na água.

Os modelos permitem ainda o cálculo do tempo de percurso entre dois pontos da rede (ou entre as origens e os pontos de consumo), e da proporção da água originária de um qualquer nó que é consumida em todos os outros nós da rede – também designada por rastreio da água proveniente de origens específicas.

Os modelos de qualidade da água simulam três processos fundamentais. Dois desses processos são devidos ao movimento da água, e são consequentemente governados pela hidráulica do sistema: o transporte ou advecção ao longo das condutas, e a mistura completa nos nós de junção.

O terceiro processo, que afecta substâncias não-conservativas, é o efeito conjunto de transformação inerente ao contacto e permanência dessa substância na água que circula no sistema, e que se pode dever a reacções com ela própria, com a água e com outras substâncias nela presentes, com o material que compõe as paredes de condutas e órgãos de armazenamento, e com o biofilme, sedimentos e partículas presentes no interior do sistema. O processo de transformação pode resultar em decaimento, aumento ou transformação noutra substância (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

A poluição de águas subterrâneas resulta numa diminuição da qualidade da água devida à existência de produtos químicos e de bactérias ou calor num grau que embora não chegue a constituir um perigo para a saúde pública afecte prejudicialmente a qualidade da água para uso doméstico, industrial ou agrícola. O termo contaminação é definido como sendo a diminuição da qualidade da água devida à existência de produtos químicos ou de bactérias num grau tal que constitua um perigo real para a saúde pública, por envenenamento ou propagação de doenças (Ferreira, 1983).

Comparando as águas subterrâneas com as de superfície observa-se que aquelas embora menos vulneráveis à poluição são de recuperação muito mais difícil quando poluídas, uma vez que o tempo necessário para a lavagem de um aquífero (da ordem de anos ou decénios) é muito superior ao necessário para a lavagem de um rio. Agravando esta situação nota-se que a poluição de um aquífero só é em geral reconhecida muito tardiamente, quando grande parte da formação se encontra já afectada. A recuperação pode ser muito difícil ou economicamente inviável, mesmo quando a fonte poluidora tenha já sido removida.

No sistema subterrâneo os materiais deslocam-se arrastados pelo escoamento e de acordo com a rede de fluxo local. A rede de fluxo é influenciada pelas características hidrogeológicas locais e regionais e ainda muitas vezes, pela actividade do homem, por exemplo por exploração ou recarga de aquíferos ou por actividades mineiras (Ferreira, 1983).

6.4 Discussão dos resultados

O **desnível topográfico máximo** entre o reservatório elevado e a zona habitada é de **84 m**. A distribuição das cotas e dos diâmetros, no sistema, está nas Figuras 6.8 e 6.9.

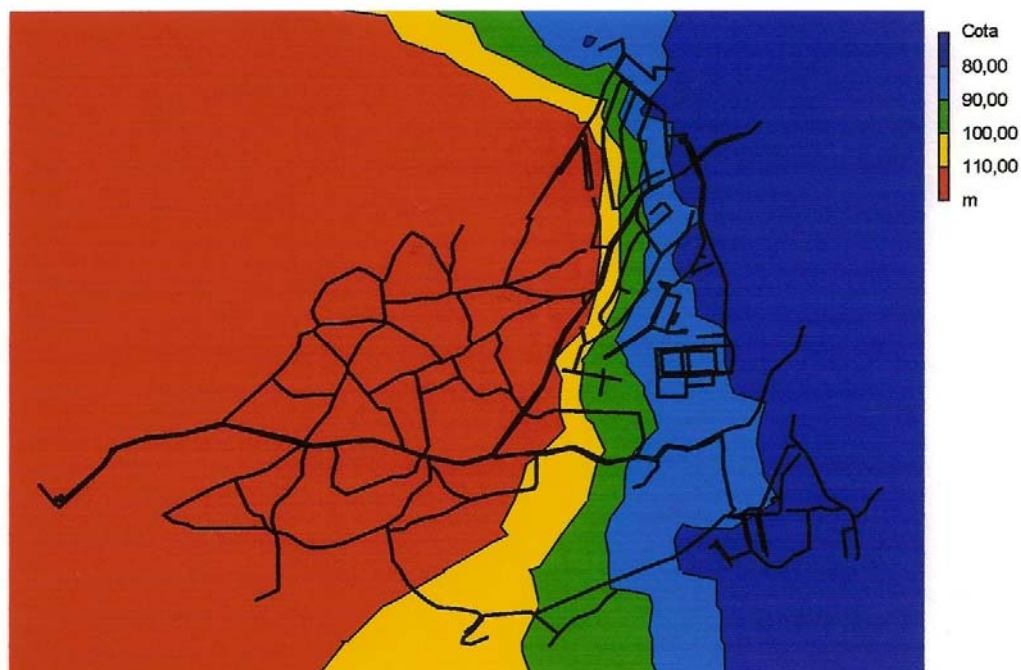


Figura 6.8 – Gráfico de isolinhas de cota topográfica.

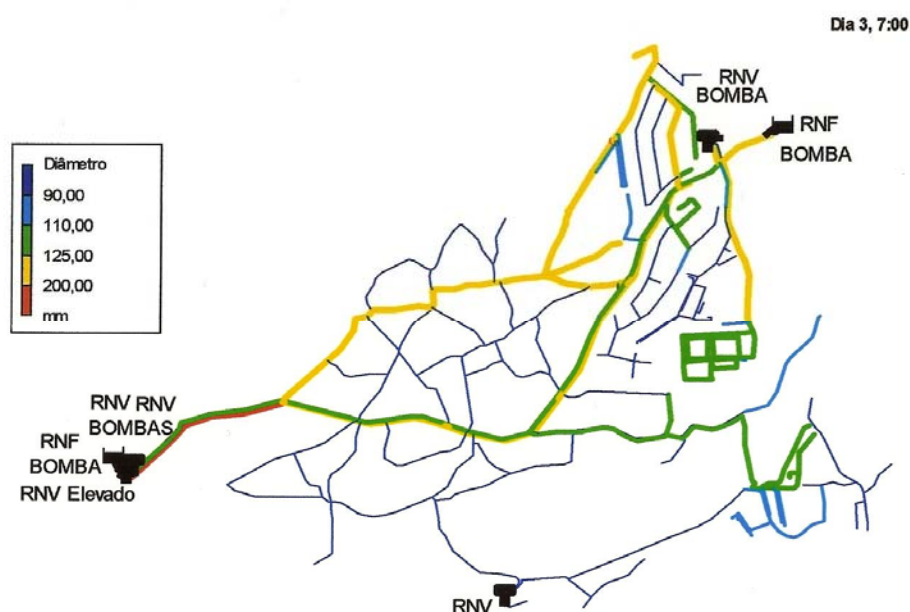


Figura 6.9 – Distribuição dos diâmetros.

Como indicado no ponto 5.8, corre-se o modelo para uma simulação de duração suficientemente longa ou atribui-se uma **idade inicial de 60 horas** para os reservatórios de nível fixo (foi introduzido **60 como valor de Qualidade Inicial**) e determina-se qual o **maior valor do tempo de percurso** que ocorre, e em que nó. Nas Figuras 6.10 e 6.11 apresentam-se as figuras do pior cenário, para as 72 horas, com o tempo de percurso nos nós e troços, e consumo nos nós e tempo de percurso nas tubagens.

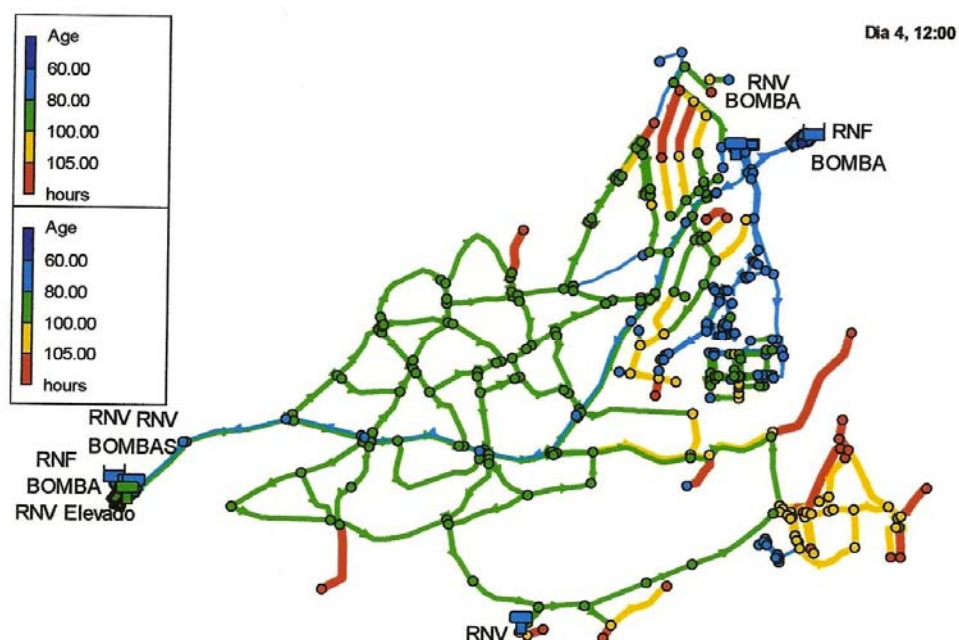


Figura 6.10 – Distribuição de tempos de percurso, após 72 horas de simulação.

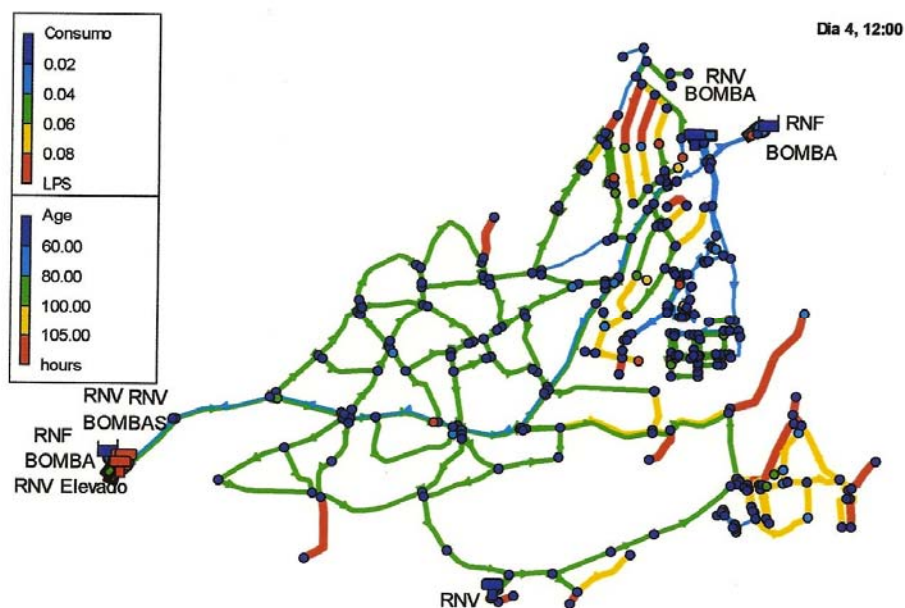


Figura 6.11 – Distribuição de tempos de percurso (tubagens) e consumos (nós), após 72 horas de simulação.

No **anexo C** visualiza-se a tabela com os resultados da simulação para os nós da rede, ordenados por tempo de percurso, para as 72 horas (a tabela mostra ainda o consumo no nó, para evitar tomar em consideração nós sem consumo, nos quais o tempo de percurso cresce continuamente ao longo de toda a simulação, por não circular através deles qualquer caudal).

As Figuras 6.12 e 6.13 representam os gráficos temporais dos tempos de percurso, para os RNV e RNF. É visível o período inicial em que o valor do tempo de percurso cresce, desde o valor zero até ao ponto em que chega ao nó a primeira água que efectuou todo o percurso (ou percursos) desde a origem.

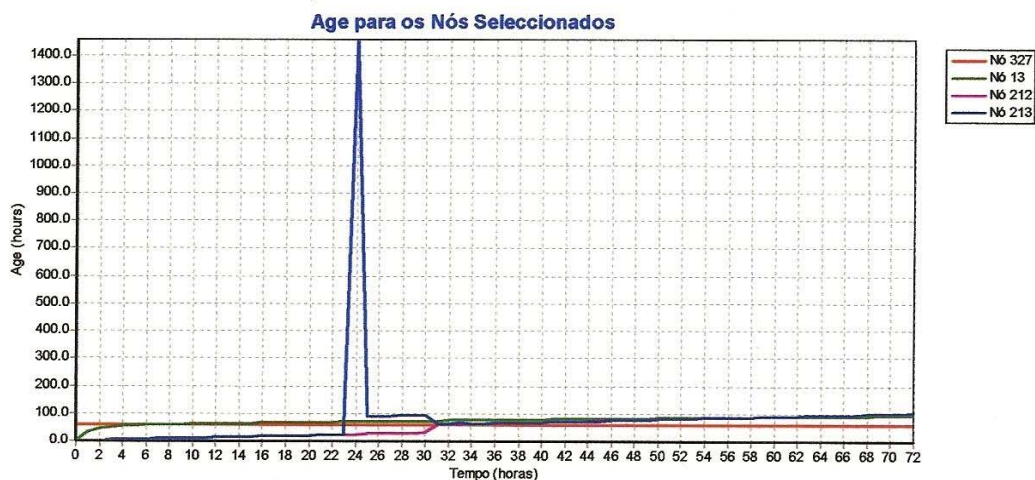


Figura 6.12 – Tempos de percurso para os RNV e RNF.

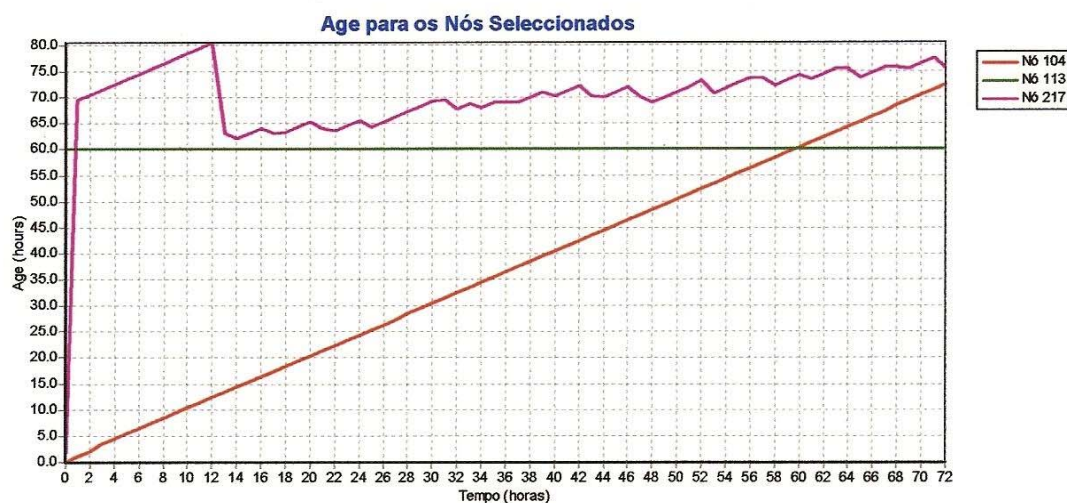


Figura 6.13 – Tempos de percurso para os RNV e RNF.

A utilidade da variável tempo de percurso é ilustrada para a selecção de **pontos de amostragem (P)**, em que, concretamente, o ponto habitual de recolha é na zona dos nós RNF 327 (P1), 106 (P2), 172 (P3), 54 (P4), 226 (P5) e 80 (P6).

A Figura 6.14 mostra o gráfico temporal do tempo de percurso nos pontos de amostragem.

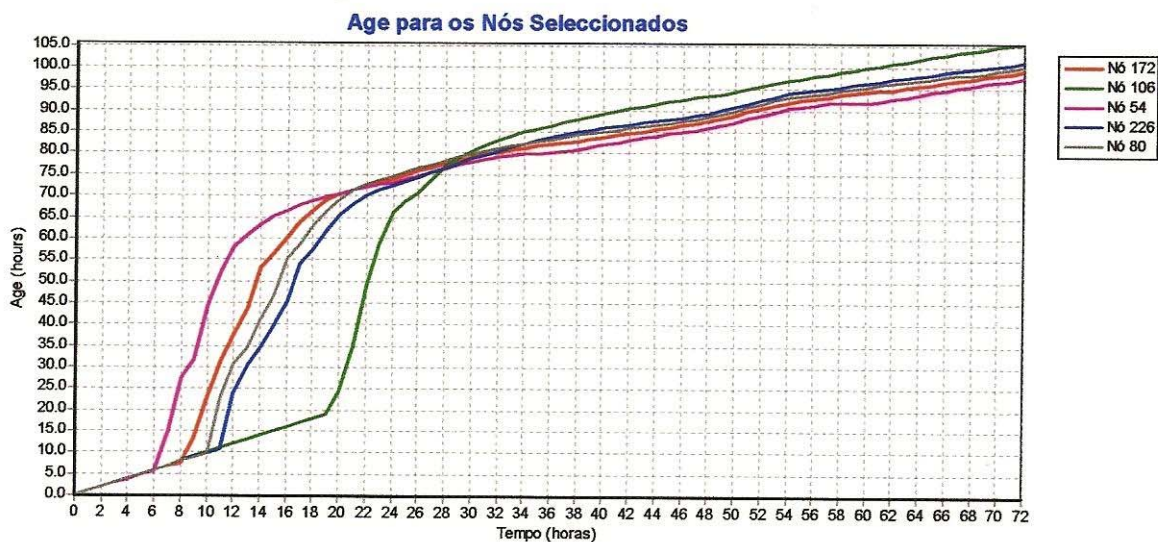


Figura 6.14 – Tempo de percurso para pontos de amostragem.

Torna-se imediatamente evidente que uma das condutas tem um tempo de percurso superior. Tal deve-se a um caudal menor, e a um acumular de valores baixos de velocidade a montante, tendo a água que circula nas condutas percursos, a montante, bastante distintos.

No caso de ocorrência de um potencial problema de qualidade, a amostragem regular poderia não ser capaz de identificá-lo. Com o benefício do modelo, parece evidente que os nós 29, 93, 103, 108 e 296 poderão ser significativos para o propósito de identificar efeitos de tempo de percurso excessivo.

O modelo de simulação torna-se assim na única ferramenta capaz de identificar com clareza este tipo de situações, e de permitir uma tomada de decisão informada sobre a escolha dos pontos de amostragem. Por outro lado, o tempo de percurso é uma variável bastante expressiva das características do comportamento hidráulico de um sistema que maior influência tem na qualidade da água distribuída.

6.5 Concentração de parâmetros não-conservativos: o caso do alumínio

O alumínio é o elemento químico n.º 13 da classificação periódica, de símbolo Al, metálico, de fraca densidade (2,65), bom condutor do calor e da electricidade, dúctil, maleável e tenaz, que, exposto ao ar, se cobre de uma delgada e invisível camada de alumina, o que o torna aparentemente inoxidável.

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre. Daí, que a sua presença no solo, na biomassa de plantas e animais e nas águas seja constante. Conhece-se um único isótopo estável e 16 instáveis, dos quais o mais persistente tem uma semi-vida de 7.1×10^5 anos.

Vamos encontrar o alumínio em numerosas rochas e compartimentos geológicos, dos quais destacaremos os seguintes exemplos (Reimann e Caritat, 1998):

- 1) Crosta terrestre no seu todo: 79.6-84.1 g/kg
- 2) Crosta terrestre superficial: 77.4-80.4 g/kg
- 3) Rochas ultramáficas: 20 g/kg
- 4) Fundo basáltico do oceano: 89 g/kg
- 5) Gabro, basalto: 83 g/kg
- 6) Granito, granodiorito: 73 g/kg
- 7) Arenitos: 37 g/kg
- 8) Argilas cinzentas e esverdeadas: 71.5 g/kg
- 9) Xistos e argilas xistosas: 91 g/kg
- 10) Calcários: 4 g/kg
- 11) Carvões: 21 g/kg

O alumínio encontra-se em diferentes minérios, dos quais destacaremos os seguintes:

- 1) Gibrite ($\text{Al}(\text{OH})_3$);
- 2) Bohemite ($\text{AlO}(\text{OH})$);
- 3) Diaspora ($\text{AlC}(\text{OH})$);
- 4) Silimanite (Al_2SiO_5);
- 5) Corundo (Al_2O_3);
- 6) Criolite (Na_3AlF_6);
- 7) Caolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) (Mendes e Oliveira, 2004).

Encontra-se ainda em minerais diversos, tais como os feldspatos, as micas e os minerais de argila. A distribuição quantitativa na biosfera pode traduzir-se nos seguintes valores estimativos:

- 1) Crusta terrestre: 1.88×10^{21} kg;
- 2) Oceanos: 2.64×10^{12} kg;
- 3) Plantas: 1.47×10^{11} kg (Mendes e Oliveira, 2004).

Nas águas naturais, os teores em alumínio em solução são em regra diminutos, como reflexo do seu comportamento anfotérico, verificando-se o mesmo na atmosfera. O alumínio pode também ser determinado em plantas, funcionando como indicadores da qualidade ambiental.

No próprio Homem o alumínio pode ser bioacumulado, quer no soro sanguíneo, quer na urina (Reimann e Caritat, 1998).

Devido à actividade antropogénica, o alumínio encontra-se presente no ar, nos alimentos e na água, sob a forma de sais solúveis, de compostos insolúveis e de substâncias coloidais.

O alumínio é, em geral, extraído da bauxite (mistura de diversos óxidos hidratados de Al) sendo depois do ferro, o metal mais utilizado pelo Homem. A lixiviação dos solos e minerais, a erosão e os efluentes e rejeições industriais constituem as vias mais vulgares de dispersão do alumínio no ambiente aquático.

As principais utilizações industriais do alumínio traduzem-se no seu uso em recipientes para bebidas, nos transportes, nas indústrias eléctricas, em produtos de consumo doméstico, em artigos de decoração, como abrasivo e como tanante, na indústria têxtil, em saneamento básico, na indústria de cimentos, etc.

No tratamento das águas naturais, destinadas à produção de água para consumo humano, o alumínio é utilizado na forma de sulfato, para provocar a coagulação/floculação das substâncias presentes na água bruta, sob a forma de materiais presentes sob a forma de suspensões coloidais (Mendes e Oliveira, 2004).

Essas substâncias, tais como argilas, matéria orgânica viva ou morta, etc., têm de ser removidas, para que a água possa ser consumida sem problemas. Pode tratar-se de substâncias, por vezes nem sequer prejudiciais, mas que, originando uma turvação na água, ou imprimindo-lhe um sabor ou uma coloração anormais, causam a rejeição do consumidor.

Essas substâncias em suspensão têm, em geral, uma carga eléctrica negativa. Em presença de iões alumínio positivamente carregados, formam-se complexos, por atracção electrostática. Originam-se assim partículas complexas, cuja dimensão e peso próprio vão conduzir à sua decantação natural, pela acção da força de gravidade (Figura 6.15).

A quantidade de sulfato de alumínio a juntar à água bruta para eliminar esses materiais em suspensão dependerá, por isso, da natureza e da quantidade dessas substâncias estranhas presentes. Mas depende, também, da acidez da água, ou, mais precisamente, do seu pH.

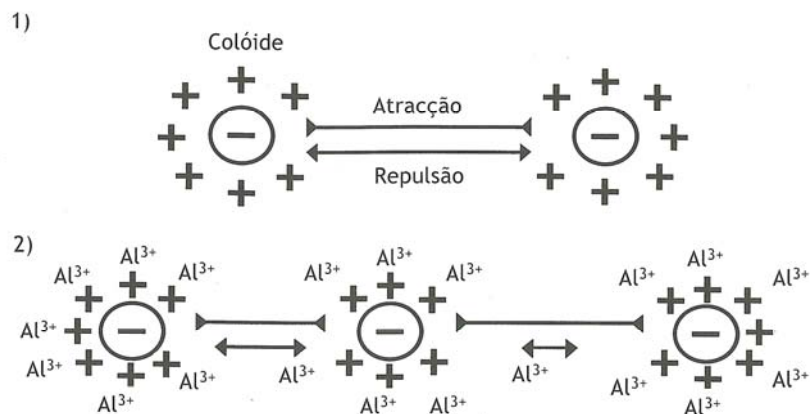


Figura 6.15 – Interações entre os colóides no processo de coagulação. 1) Suspensão estável: as forças de atracção e de repulsão entre as partículas (colóides) mantêm-nas afastadas; 2) Coagulação das partículas: as forças de atracção aumentam, devido à contracção das camadas eléctricas, em redor das partículas, por adição do catião alumínio (Al^{3+}) (adaptado de Hammer, 1986).

De qualquer modo, nem todo o alumínio adicionado fica no precipitado. Uma parte mantém-se em solução, constituindo alumínio residual, que depois se encontra na água de beber (Figuras 6.16 e 6.17).

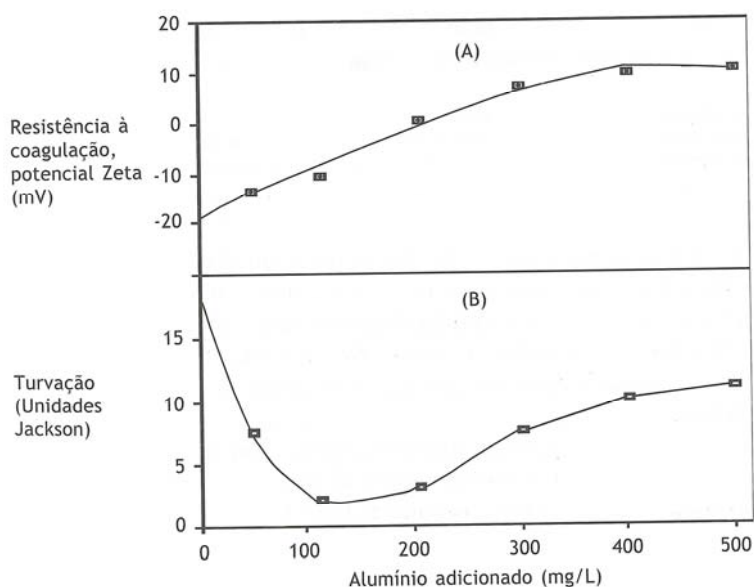


Figura 6.16 – (A) Variação da resistência das partículas (colóides) à coagulação, com a adição de alumínio (Al^{3+}). (B) Variação da turvação de uma água, com a adição de alumínio (Al^{3+}) (adaptado de Eckenfelder JR., 1979).

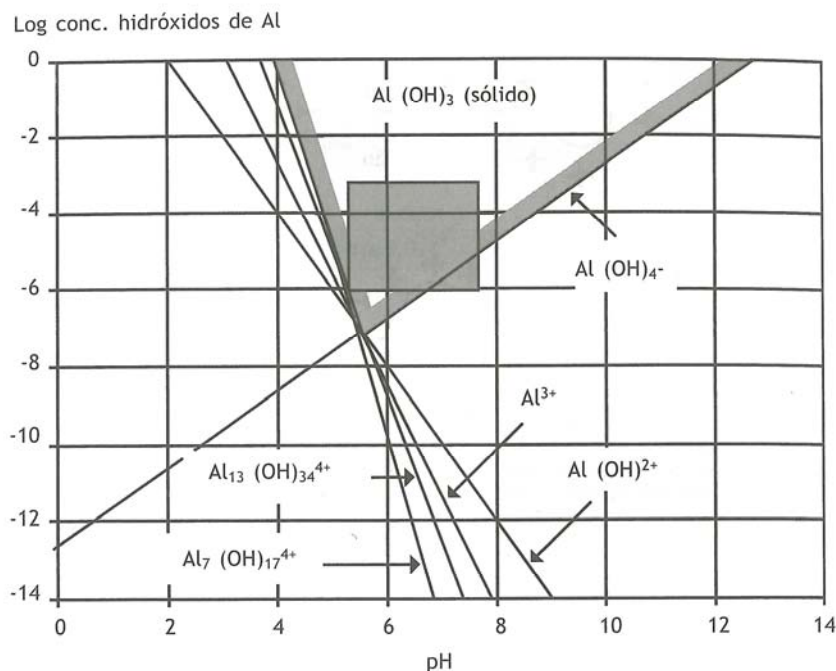


Figura 6.17 – Variação da concentração de diferentes espécies de hidróxidos de alumínio em águas com diferentes valores de pH. As zonas sombreadas representam as condições aproximadas da operação de coagulação em tratamentos de águas (adaptado de Bratby, 1980).

O problema conhece, porém, uma complicação suplementar. As precipitações ácidas, resultantes da poluição atmosférica com compostos de azoto e enxofre, provocam a formação de ácidos fortes (nítrico e sulfúrico), que acidificam a água da chuva. O pH normal dessas águas da chuva andará por cerca de 5.5 (devido ao ácido carbónico formado por dissolução do anidrido carbónico na água). Devido à presença dos compostos ácidos, atrás referidos, e de outros menos importantes, o pH da água da chuva pode apresentar valores inferiores a 4 (Ramade, 1987).

Essas “chuvas ácidas”, além de afectarem os organismos vivos (plantas, microrganismos do solo, organismos aquáticos), desagregam os minerais de argila, constituídos, em parte, por compostos de alumínio. O teor em alumínio das águas naturais sofre, por isso, um aumento significativo. À medida que o pH baixa, a solubilidade do alumínio aumenta e os seus teores podem tornar-se mais elevados.

Mas quais são as consequências daí resultantes em termos de qualidade da água? O problema mais importante reside no facto desse alumínio residual formar, para teores acima dos 0.5 mg/l (para os valores usuais do pH da água de beber), compostos insolúveis, tais como o hidróxido de alumínio e outros. Resulta daí a formação de um precipitado esbranquiçado que torna a água não potável, por deixar de obedecer às normas fixadas quanto à turvação.

Mas esse precipitado não é, necessariamente, tóxico, para aquelas quantidades. A Suíça, por exemplo, admite, como valor máximo aceitável de alumínio na água, 0.5 mg/l. E a dose que provoca situações de toxicidade, a chamada Dose Letal Média, corresponde a 2.4 g/kg, ou seja, mesmo para uma criança com 10 kg de peso, a toxicidade só ocorrerá, com uma probabilidade de 50%, se ela ingerir 24 gramas de alumínio, valor praticamente inatingível.

Cada pessoa recebe, em média, por dia, dos alimentos que consome, entre 300 a 400 mg de alumínio. O contributo do alumínio da água, para uma pessoa saudável (que elimina naturalmente os excessos), é sempre uma fracção muito pequena dos teores letais. E não nos podemos esquecer da reduzida solubilidade dos sais de alumínio, o que limita, ainda mais, os potenciais efeitos adversos (Mendes e Oliveira, 2004).

Os problemas de Saúde Pública conhecidos (doença de Newcastle) corresponderam a teores anormalmente elevados daquele elemento na água, por esta apresentar uma acidez muito elevada. Para além disso, os casos verificados tiveram outras origens, além do alumínio, correspondendo a situações de maior susceptibilidade ou de menor resistência dos indivíduos-alvo.

Os problemas de toxicidade devidos ao alumínio são de temer em pessoas que não tenham capacidade de o eliminar, e que estejam sujeitas a processos de acumulação progressiva, que podem levar a que sejam atingidos os níveis tóxicos referidos.

Como exemplo, temos o caso de doentes do hospital de Évora sujeitos a hemodiálise, doentes esses que não tiveram capacidade de eliminar eficientemente o alumínio que ingeriram.

Contudo, é de realçar, antes de mais, que não é legítimo usar qualquer tipo de água para fins que não correspondem às suas características próprias. Não é, por isso, admissível usar água destinada ao consumo corrente, para hemodiálise ou para outros fins, que exijam o uso de água respeitando parâmetros físico-químicos específicos.

Recorrendo-se, como se fez nesse caso, à água de consumo, que continha níveis de alumínio superiores aos admissíveis para hemodiálise, mesmo que dentro dos limites autorizados da água para consumo, provocou-se uma acumulação excessiva de alumínio nesses doentes.

Essa acumulação, além de induzir lesões e processos metabólicos anormais, decorre não só do alumínio da água e dos alimentos, mas também do alumínio de medicamentos que lhes são administrados, normalmente para combater alguns dos sintomas dessa etiologia complexa.

No caso de insuficientes renais crónicos e de doentes submetidos a hemodiálise, o excesso de alumínio pode provocar riscos de encefalopatias crónicas, com reflexos neurológicos e psíquicos.

O problema do abastecimento das unidades de diálise deverá ser encarado com o devido cuidado, sem esquecer que:

- 1) A água destinada a esse fim não é, obviamente, a da rede de abastecimento público;
- 2) Deveriam existir normas estritas de qualidade dessa água, infelizmente ainda não publicadas em Portugal (Mendes e Oliveira, 2004).

O alumínio ingerido pelo Homem não é armazenado (excepto uma pequena fracção no tecido ósseo), sendo excretado sem problemas, no caso dos indivíduos saudáveis.

Os equipamentos de hemodiálise, para além de outras exigências específicas a fazer a essa água, deverão estar equipados com sistemas de osmose inversa e/ou desionização, para garantir um teor máximo admissível de 0.03 mg/l de alumínio.

De acordo com a União Europeia, os compostos de alumínio altamente solúveis poderão induzir tóxicos graves, como sucede no caso de compostos de alumínio contendo nitratos e cloretos. Muitos desses compostos, bem como o alumínio em pó, são classificados, a nível comunitário, como produtos perigosos.

O alumínio em solução pode ser acumulado pelas plantas, em condições de pH ácido. É o caso que se verifica, por exemplo, na mostarda e no chá, entre outros.

Tem sido também aventada a relação entre o Alumínio e a doença de Alzheimer, sem que existam conclusões definitivas (Mendes e Oliveira, 2004).

O alumínio é analisado por espectrofotometria de absorção atómica, com atomização electrotérmica, de modo a obterem-se os níveis de rigor desejáveis.

A legislação portuguesa de 1998, que substituiu o Decreto-Lei nº 74/90, não alterou os valores paramétricos do alumínio.

A nova directiva relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano, assim como o Decreto-Lei nº 243/2001 e o Decreto-Lei nº 306/2007, consideram o alumínio como parâmetro indicador, fixando o valor paramétrico de 200 µg/l. Especificam ainda as seguintes características quanto ao método de análise a utilizar:

- 1) Exactidão em % do valor paramétrico – 10;
- 2) Precisão em % do valor paramétrico – 10;
- 3) Limite de detecção em % do valor paramétrico – 10.

O facto do parâmetro alumínio ter sido conservado, liga-se ao facto de ser indicativo do funcionamento de uma ETA, nomeadamente da sua eficiência, aquando da eliminação potencialmente incompleta de eventuais organismos patogénicos presentes na água bruta.

O parâmetro Alumínio quando não é utilizado como agente floculante, faz parte apenas do controlo de inspecção, definido no Decreto-Lei nº 306/2007.

O alumínio presente na água resulta, em regra, do sulfato de alumínio, utilizado como coagulante no tratamento de água bruta, ou como resultado da desagregação dos minerais de argila, devido às chuvas ácidas.

A decantação e filtração permitem eliminar a maior parte do alumínio presente, sob a forma de sais insolúveis.

É importante, porém, garantir o controlo do pH e da condutividade da água nas unidades de tratamento e realizar operações sistemáticas de manutenção da rede, através de purgas e de limpeza de reservatórios (Mendes e Oliveira, 2004).

Na **qualificação da água para consumo humano**, aparecem alguns parâmetros que não estão directamente ligados a aspectos sanitários. Trata-se dos chamados elementos **indesejáveis**, assim designados por não terem efeitos tóxicos, aos níveis usuais de consumo, mas por provocarem alguns efeitos visíveis, e não desejáveis, no decurso da sua utilização.

Esses elementos compreendem o ferro, o manganésio, o zinco, o cobre e o alumínio, de entre os mais geralmente citados.

Trata-se de elementos essenciais à vida (como sucede com o Fe, o Mn, o Cu ou o Zn), mas que, quando presentes na água em doses superiores às aceitáveis, ocasionam efeitos visíveis não desejáveis, tais como a formação de manchas na roupa, nas louças sanitárias, etc..

As doses tóxicas, para esses elementos, são muito mais elevadas que as doses recomendadas e aceitáveis para a água de consumo (Mendes e Oliveira, 2004).

A classificação do alumínio, no quadro dos parâmetros de qualidade, no âmbito dos chamados parâmetros físico-químicos, poderia, por isso, ser diferente da usada na anterior legislação, comunitária e nacional. A OMS considera o alumínio como parâmetro indesejável, classificação essa que parece mais de acordo com os riscos sanitários associados.

6.6 Caracterização das ETA – Estações de tratamento de água para consumo humano portuguesas

O Quadro 6.1 sistematiza a informação relativa aos tipos de reagentes e de órgãos utilizados nas UOP – Unit operation/process (operação/processo unitário de tratamento de água), relevante para controlo dos contaminantes eventualmente presentes nas origens de água.

Em termos de tratamento da fase sólida, a informação disponível é mais escassa, ainda assim, identificaram-se as UOP expectáveis, predominando o espessamento e a desidratação das lamas. O tratamento de lamas e a gestão de sobrenadantes e escurências a este associada é relevante para o controlo de contaminantes, uma vez que estes podem ser concentrados nas lamas, mas, principalmente, porque podem ser recirculados para a linha de tratamento de água (fase líquida) através dos sobrenadantes e escurências (Rosa, Vieira e Menaia, 2009).

Para a análise das capacidades e limitações das ETA no controlo de contaminantes eventualmente presentes na água bruta, definem-se, nove classes de ETA, sendo seis destas associadas a origens de água superficial (Quadro 6.2) e três associadas a origens de águas subterrâneas (Quadro 6.3) (Rosa, Vieira e Menaia, 2009).

A classe I_{sup} corresponde à sequência convencional de tratamento e é composta por pré-oxidação, coagulação, floculação, decantação, filtração, ajuste de pH/agressividade e desinfecção final, por esta ordem.

A subclasse I.1_{sup} é um caso particular da I_{sup}, referindo-se aos casos em que na pré-oxidação é utilizado ozono. A subclasse I.2_{sup} refere-se aos restantes casos em que na pré-oxidação são utilizados todos os outros oxidantes atrás identificados (hipoclorito de sódio, cloro gasoso e dióxido de cloro).

A classe II_{sup} corresponde à sequência de tratamento convencional sem pré-oxidação, i.e., composta por coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção final, por esta ordem.

Quadro 6.1 – Tipos de reagentes e de órgãos usados nas ETA portuguesas.

Tipo de tratamento	Reagente/órgão	Tipo de origem		
		Subterrânea	Superficial	Mistura
Pré-oxidação	cloro gasoso	√	√	
	dióxido de cloro		√	
	hipoclorito de sódio	√	√	√
	Ozono		√	
	permanganato de potássio		√	
Coagulação/floculação	carvão activado (i)		√	√
	saís de ferro	√	√	
	hidróxido de cálcio	√	√	
	polielectrólito	√	√	√
	saís de alumínio	√	√	√
Correcção da dureza	ácido sulfúrico			
	carbonato de sódio		√	
	dióxido de carbono			
	hidróxido de cálcio	√	√	
	hidróxido de sódio			
Correcção da agressividade	ácido sulfúrico			
	carbonato de sódio	√	√	
	dióxido de carbono		√	
	hidróxido de cálcio	√	√	√
	hidróxido de sódio		√	
Correcção do pH	ácido sulfúrico		√	
	carbonato de sódio	√	√	
	dióxido de carbono	√	√	
	hidróxido de cálcio	√	√	√
	hidróxido de sódio	√	√	
Remoção de ferro e manganês	arejamento	√	√	√
	oxidação química	√	√	
Decantação	decantador convencional	√	√	√
	decantador de manto de lamelas		√	
	decantador lamelar		√	
Filtração	filtro rápido de areia	√	√	√
	filtro lento de areia	√	√	
	filtro rápido de dupla camada (areia+antracite)	√	√	
	filtro lento de dupla camada (areia+antracite)	√		
	filtro rápido de dupla camada (areia+carvão activado)	√	√	
	filtro rápido de carvão activado		√	
Desinfecção	cloro gasoso	√	√	
	dióxido de cloro	√	√	
	hipoclorito de sódio	√	√	√
	ozono		√	
	radiação UV	√	√	

Fonte: Adaptado de Vieira *et al.* (2007).

(i) Em ETA convencionais o carvão activado em pó (PAC) pode ser adicionado na mistura rápida para adsorção de contaminantes.

Quadro 6.2 – Classes de ETA para águas superficiais.

Classe	Sequência de tratamento
I.1_sup	Pré-oxidação (ozono) → Coagulação → Floculação → Decantação → Filtração → Ajuste pH (i) → Desinfecção
I.2_sup	Pré-oxidação (outros oxidantes) → Coagulação → Floculação → Decantação → Filtração → Ajuste pH (i) → Desinfecção
II_sup	Coagulação → Floculação → Decantação → Filtração → Desinfecção
III.1_sup	Pré-oxidação (ozono) → Coagulação → Floculação → Filtração → Desinfecção
III.2_sup	Pré-oxidação (outros oxidantes) → Coagulação → Floculação → Filtração → Desinfecção
IV_sup	Coagulação → Floculação → Filtração → Desinfecção

(i) Ajuste de pH ou de agressividade.

Quadro 6.3 – Classes de ETA para águas subterrâneas.

Classe	Sequência de tratamento
I_sub	Pré-oxidação → Amaciamento → Filtração → Ajuste pH (i) → Desinfecção
II_sub	Pré-oxidação → Filtração → Ajuste pH (i) → Desinfecção
III_sub	Desinfecção (ii)

(i) Ajuste de pH ou de agressividade.

(ii) Poderá ser precedida por um ajuste de pH ou de agressividade.

A classe III_sup corresponde à sequência de pré-oxidação e filtração directa, i.e., inclui pré-oxidação, coagulação, floculação, filtração e desinfecção final, nesta ordem. Também neste caso, há que distinguir as ETA que usam ozono das que utilizam os outros oxidantes – definem-se, portanto, as subclasses III.1_sup (com ozono) e III.2_sup (com outros oxidantes).

A classe IV_sup consiste na sequência de tratamento convencional com filtração directa e sem pré-oxidação, i.e., inclui coagulação, floculação, filtração e desinfecção final, por esta ordem.

A classe I_sub corresponde à sequência completa para águas de origem subterrânea – pré-oxidação, remoção de dureza (amaciamento) por precipitação química, floculação, decantação, filtração, ajuste de pH e desinfecção.

A classe II_sub é uma simplificação da anterior sem a remoção de dureza.

A classe III_sub consiste na desinfecção, que pode ser precedida por um ajuste de pH ou de agressividade.

As classes I_sup, II_sup e I_sub podem contemplar a adição de PAC-Powdered activated carbon (carvão activado em pó) na mistura rápida.

No Quadro 6.4 caracteriza-se o contaminante inorgânico em termos das propriedades que condicionam a sua remoção por UOP físico-químicas – a carga do ião, o estado de oxidação do elemento, se forma precipitados e, em caso afirmativo, quais os seus compostos mais insolúveis e respectivo valor de pH de solubilidade mínima (a 25 °C). Discriminam-se as propriedades das espécies com diferentes estados de oxidação e identificam-se os OBP – Oxidation by-products (subprodutos da oxidação) indesejáveis e os seus precursores.

Do Quadro 6.4 decorre que a estratégia de controlo de metais e outros contaminantes inorgânicos, em geral, envolve:

- i) em ETA convencionais, a sua remoção por precipitação química, floculação (para os precipitados adquirirem sedimentabilidade) e decantação, podendo eventualmente ser necessário ajustar o estado de oxidação (optimização da pré-oxidação e/ou redução química por adição de um agente redutor na mistura rápida) e/ou o pH (ao valor de solubilidade mínima); podem também ser efectuados polimentos por co-precipitação com sais de alumínio ou ferro e/ou por filtração;
- ii) em alternativa, a sua remoção por permuta iónica (IX – Ion exchange) ou tecnologias de membranas [ED – Electrodialysis (electrodialise) ou RO – Reverse osmosis (osmose inversa)] (Rosa, Vieira e Menaia, 2009).

Quadro 6.4 – Contaminante inorgânico.

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento			
	Iões predominantes	Estado de oxidação	Forma precipitado?	Compostos de menor solubilidade em água (pH de solubilidade mínima) (i)
Alumínio	Al^{3+} (pH baixo) $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, ... $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ (ii) $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (pH elevado)	+3	S	$\text{Al}(\text{OH})_3$ (~ 6.3) (a pH elevado, ressolubiliza-se como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$)

Fontes: Lide (1990), AWWA (1999), Eckenfelder (2000); WHO (2006).

S O contaminante possui essa característica.

(i) Entre parêntesis, indica-se o pH de solubilidade mínima do composto apresentado;

(ii) Espécies coagulantes, mononucleares e polinucleares.

No caso dos contaminantes inorgânicos o método convencional de remoção de compostos inorgânicos é a precipitação química, floculação e decantação, podendo eventualmente ser necessário ajustar o estado de oxidação (optimização da pré-oxidação e/ou redução química por adição de um agente redutor na mistura rápida) e/ou o pH (ao valor de solubilidade mínima). Para tal, deve identificar-se o composto de menor solubilidade do elemento, respectivo estado de oxidação do elemento e pH de solubilidade mínima do composto. A precipitação é, assim, conseguida por adição do sal com contra-íão necessário, não podendo existir complexantes na água (e.g., CN^- e NH_3^+) que, caso existam, devem ser removidos previamente à precipitação química (Rosa, Vieira e Menaia, 2009).

Por norma, para os metais, a escala de insolubilidade é a seguinte: sulfuretos > hidróxidos > carbonatos. Usualmente, as solubilidades são inferiores a pH mais elevado.

Em ETA que só possuem decantação após a precipitação química obtêm-se, em geral, residuais de 1-2 mg/l, mas, se existir também uma filtração, conseguem-se valores inferiores a 0.5 mg/l (Eckenfelder, 2000).

As estações que fazem filtração directa também têm capacidade para retenção de precipitados, mas há que ter em atenção a eventual ocorrência da sobrecarga de sólidos nos filtros e o risco acrescido de “breakthrough” (libertação brusca de elevada quantidade de material retido no filtro).

Em qualquer tipo de precipitação, deve ser tida em consideração a competição dos cátions da água (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+}) pelo agente precipitante.

Considerou-se no Quadro 6.5 que o esquema II_sub não permite a adição de agente precipitante. Esta limitação pode, eventualmente, ultrapassar-se se essa adição puder ser feita na câmara de pré-oxidação e se não houver necessidade de oxidação ou redução do metal previamente à sua precipitação.

Quadro 6.5 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção de contaminante inorgânico.

Contaminante	Sequência de tratamento								
	I.1_sup	I.2_sup	II_sup	III.1_sup	III.2_sup	IV_sup	I_sub	II_sub	III_sub
Alumínio (i)	++	++	++	+	+	+	++	-	-

Fontes: AWWA (1999), Eckenfelder (2000), WHO (2006).

-	O esquema de tratamento não permite controlar o contaminante.
+	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
++	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação) melhor do que o esquema classificado com “+” (barreiras múltiplas ou UOP mais eficientes).

(i) A valores de pH elevados, os residuais podem ser maiores uma vez que se formam espécies solúveis (no caso do alumínio, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$; no caso do ferro, $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$).

O **tratamento complementar** para contaminantes inorgânicos (Quadro 6.6) consiste na sua remoção por tecnologias de membranas [NF – Nanofiltration (nanofiltração), RO ou ED], permuta iónica, sistemas GAC – Granular activated carbon (carvão activado granulado)/BAC – Biotically active carbon (carvão activado granulado com actividade biológica) ou usando outros adsorventes, e.g., alumina activada. A nanofiltração controla de forma eficaz iões multivalentes, radionuclídeos e parcialmente os iões monovalentes. Os sistemas de membranas não apresentam os efeitos negativos de competição entre contaminantes a remover encontrados noutras tecnologias. No entanto, têm em comum com os sistemas de permuta iónica a desvantagem de aumentarem a agressividade da água, tanto mais quanto menor for a dureza final da água (membranas e IX), ou maior for o teor em cloreto (IX aniónica). Os filtros de carvão activado (GAC/BAC) apresentam potencialidades para metais e radionuclídeos (desempenho muito dependente do volume de água tratada e da composição da água – pH, matéria orgânica e outros iões incluindo os da dureza, além do tipo e granulometria do carvão usado). Os filtros GAC/BAC podem ainda controlar outros contaminantes inorgânicos por adsorção e/ou por redução química (Rosa, Vieira e Menaia, 2009).

Quadro 6.6 – Tratamento complementar ou alternativo para controlo de contaminante inorgânico.

Contaminante	Tipo de tratamento					
	NF	RO	ED	IX	GAC/BAC	Adsorção a alumina activada
Alumínio	+	+	+	+	+/-	

Fontes: AWWA (1990), AWWA (1999), Eckenfelder (2000), Marhaba (2000), STUK (2000), Dianati-Tilaki e Ramazan Ali (2003), Huang *et al.* (2004), Kanokkantapong e Jiradecha (2005), WHO (2006), Genç-Fuhrman *et al.* (2007), Rosa *et al.* (2007).

+/-	A UOP permite controlar parcialmente o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
+	A UOP permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
	Não há informação disponível.

GAC: carvão activado granulado; BAC: carvão activado granulado com actividade biológica; NF: nanofiltração; RO: osmose inversa; ED: electrodiálise; IX: permuta iónica.

6.7 Tempo de percurso e crescimento do alumínio

O teor de alumínio da água tratada aumenta desde a captação até à torneira do consumidor, devido a reacções que ocorrem no seio da água, quer na interface com as paredes dos componentes do sistema.

Qualquer dos efeitos é directamente dependente do tempo de percurso da água no interior do sistema e do tempo de residência nos reservatórios. A consumos inferiores aos previstos corresponderão velocidades de escoamento baixas e maiores tempos de percurso (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

O problema dos longos tempos de percurso é também frequentemente encontrado nos sistemas de distribuição, nomeadamente nas zonas ramificadas terminais com baixos consumos, em que muitas vezes os diâmetros são sobredimensionados, por razões que vão desde a necessidade de satisfazer caudais de incêndio, a estimativas de consumo e/ou adopção de coeficientes de ponta excessivos no projecto (Alegre e Coelho, 1998).

6.8 Simulação do alumínio

Na Figura 6.18 visualizam-se os níveis de **alumínio** na rede e às 72 horas, onde se encontram zonas críticas de **concentração maior**.

Para o **Coefficiente de Reacção no Seio do Escoamento** foi introduzido o valor **0.1**. Este coeficiente pretende traduzir a taxa de crescimento do alumínio devido a reacções na água ao longo do tempo. Ao **RNF 327** foi atribuído o valor **0.20 mg/l** na **Qualidade Inicial** que corresponde ao valor paramétrico estabelecido no Decreto-Lei nº 306/2007, de 27 de Agosto, e ao **RNF 113** o valor **0.05 mg/l**.

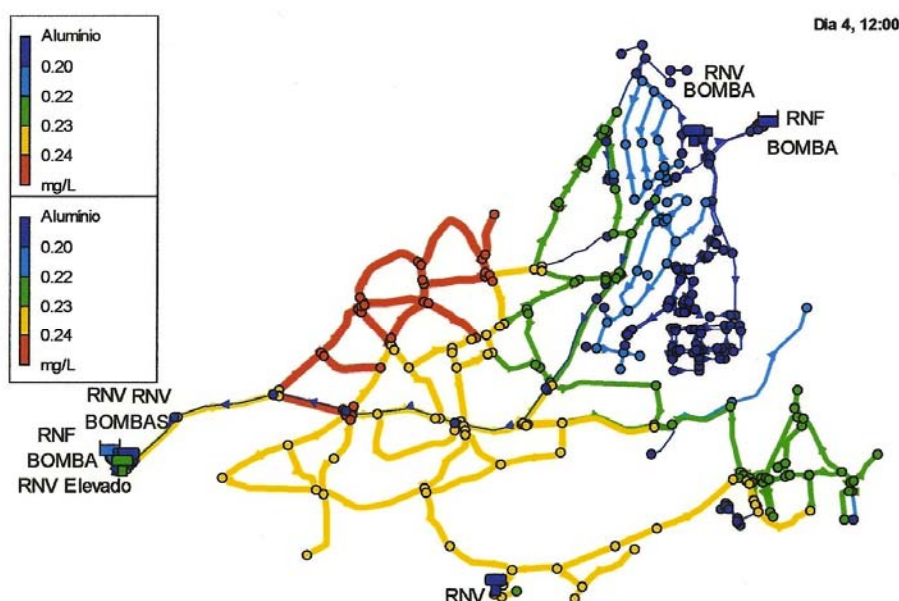


Figura 6.18 – Concentrações de alumínio maiores.

O Relatório de Reacção, apresentado na Figura 6.19, para esta simulação expõe o gráfico de resultados que mostra, em termos médios, a quantidade de alumínio nas tubagens e nos RNV. O crescimento do alumínio refere-se a reacções que ocorrem entre espécies químicas presentes na água transportada e nos RNV.

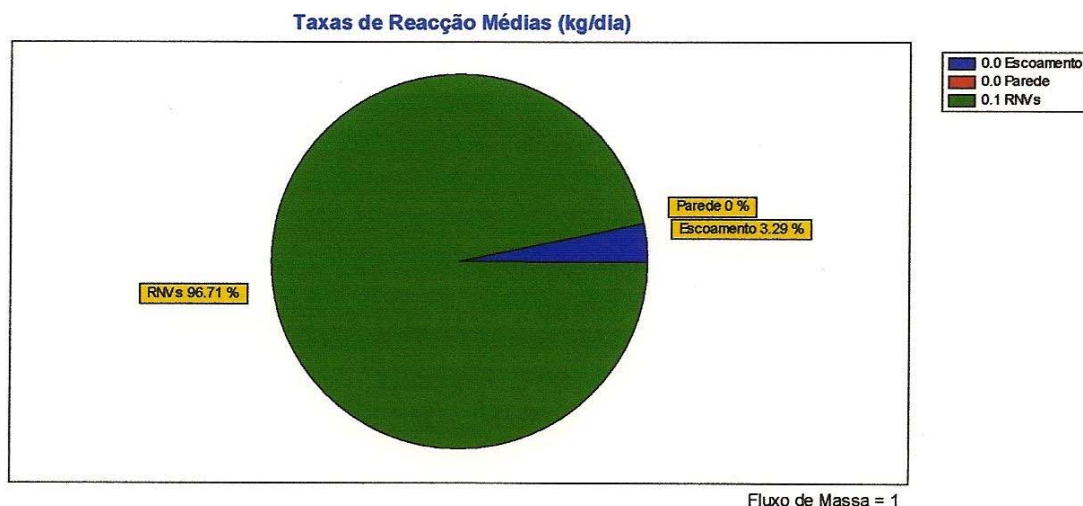


Figura 6.19 – A quantidade de alumínio nas tubagens e nos RNV.

No **anexo D** encontra-se a tabela com os resultados da simulação para os nós da rede, ordenados por consumo, carga hidráulica, pressão e alumínio, para as 72 horas.

6.9 A utilização da modelação no contexto do planeamento

A reabilitação de redes pode ser motivada pelo estado de degradação de componentes da rede (p.ex., condutas, reservatórios), aumento dos consumos na rede existente, perdas reais elevadas, necessidade de expansão da rede existente, melhoramentos das infra-estruturas vizinhas (p.ex., reconstrução de ruas, redes de drenagem), aumento da flexibilização da gestão da rede e problemas de qualidade da água (Walski *et al.*, 2003).

O uso de modelos de simulação é fundamental para a identificação dos componentes críticos do sistema a reabilitar e para o estabelecimento de cenários alternativos de reabilitação. A simulação deve ser combinada com informação relativa a roturas de condutas, fugas, problemas de qualidade da água e reclamações de clientes. Ao nível da reabilitação, os modelos de simulação assumem um papel fundamental na identificação e minimização de problemas que limitem a capacidade hidráulica do sistema (p.ex., aumento excessivo dos consumos, tuberculização das tubagens, dimensionamento inadequado de instalações especiais) ou a qualidade da água entregue aos consumidores.

Na fase de planeamento, a análise da capacidade hidráulica do sistema e a identificação de potenciais problemas pode ser feita a partir de modelos simplificados e não calibrados. A execução de simulações estáticas, para os cenários de maior consumo (p.ex., caudal de ponta instantâneo, caudal médio diário com caudal de incêndio em pontos-chave), permite analisar a distribuição de pressões e identificar troços com maior perda de carga unitária.

A análise da capacidade hidráulica também pode ser motivada por valores excessivos de pressão na rede. A análise das **pressões máximas** deve ser feita para os **cenários de baixo consumo**, como se apresenta na Figura 6.20.

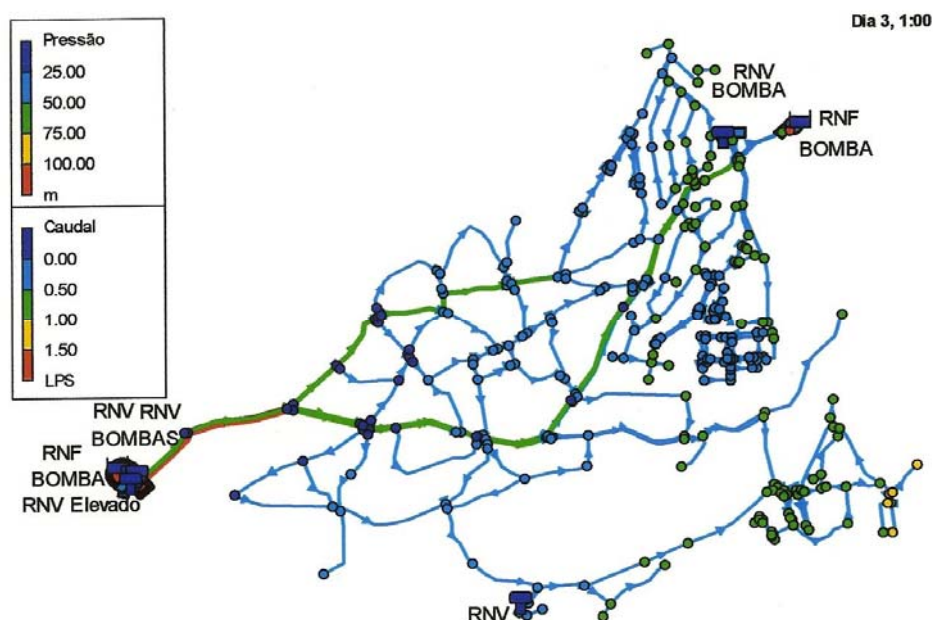


Figura 6.20 – Pressões máximas (nós) para o cenário de baixo consumo (tubagens).

No caso da reabilitação de condutas para promover o aumento da capacidade hidráulica, o modelo permite simular se é preferível adoptar técnicas de reabilitação não estruturais, como seja a limpeza das condutas (o que implica no modelo uma alteração no factor de rugosidade) ou efectuar substituições pontuais na rede por condutas de maior diâmetro (o que implica no modelo uma alteração de diâmetros). Ao nível da fase de projecto, e na posse de informação de detalhe sobre a topologia, consumos e modos de operação, pode tirar-se partido de simulações hidráulicas e de qualidade da água, em período alargado, para apoio aos projectos de reabilitação (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

Nesta fase não foi possível obter medições de caudais da rede, pelo que os **padrões de consumo** foram estimados com base em **diagramas-tipo de sistemas com características semelhantes**.

6.10 A utilização da modelação no contexto do projecto

Apresentam-se, seguidamente, tipos de utilização da modelação no contexto do projecto:

► **Dimensionamento das instalações especiais (captações, instalações elevatórias, reservatórios), em condições normais de funcionamento** - Simulações em período alargado permitem também avaliar os ciclos de enchimento e esvaziamento, ou no caso de estações elevatórias, estimar a duração dos ciclos, conhecer os pontos de funcionamento e estimar os custos de energia.

Por exemplo, no caso dos reservatórios, uma simulação para o dia de consumo máximo, deve ter uma duração de pelo menos 48 horas para analisar a capacidade de recuperação do volume armazenado (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

A mistura e o envelhecimento da água no interior dos reservatórios afectam a qualidade da água, sendo o envelhecimento da água usualmente o parâmetro determinante (Walski *et al.*, 2003). Os **consumos** nos **RNF** e nos **RNV** apresentam-se nas Figuras 6.21 e 6.22.

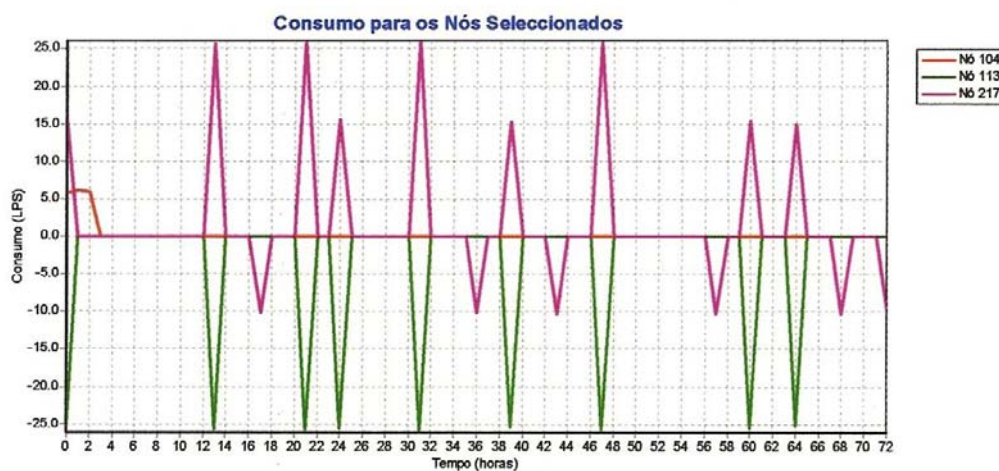


Figura 6.21 – Consumos em RNF e RNV.

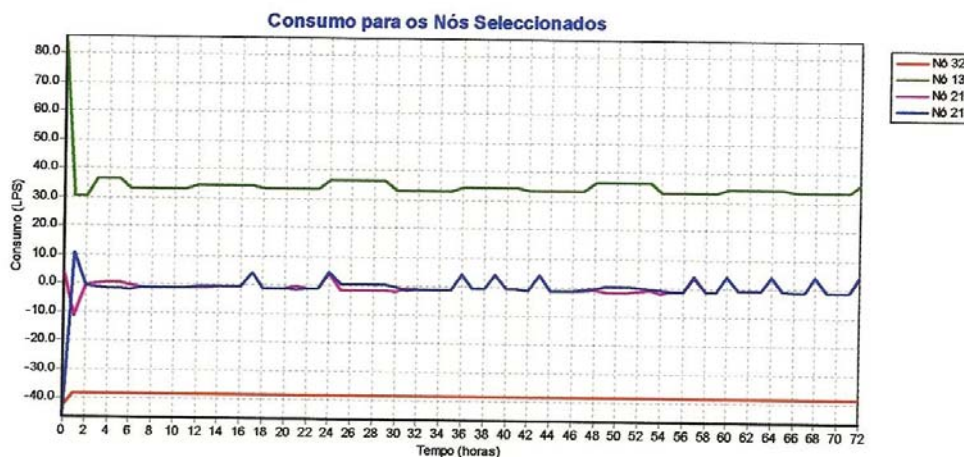


Figura 6.22 – Consumos em RNF e RNV.

O modo de operação do sistema elevatório consiste na conduta de aspiração ligada a uma conduta da rede, a elevação de caudal é feita directamente para a rede, com recurso a bomba de velocidade fixa, a partir do RNV 217.

► **Dimensionamento de condutas adutoras e elementos acessórios, em condições normais de funcionamento** - O Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais refere que o sistema adutor é geralmente dimensionado para o caudal do dia de maior consumo, devendo a capacidade do reservatório ser calculada para cobrir as flutuações horárias, ao longo do dia. É importante garantir também que a classe de pressão escolhida é adequada às pressões máximas atingidas, sendo neste caso os cenários críticos os de menores caudais transportados.

Para efeitos de verificação de pressões, a simulação estática é suficiente. Para a verificação da capacidade de transporte já se justifica o uso de simulação dinâmica. Só deste modo será possível analisar o funcionamento integrado dos reservatórios, das instalações elevatórias e das adutoras, atendendo aos diferentes padrões de consumo em causa.

Para além dos referidos aspectos hidráulicos, o dimensionamento de condutas adutoras deve ainda atender aos aspectos de qualidade da água (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006). Deste ponto de vista, é necessário garantir que os tempos de percurso não são excessivamente elevados, pondo em risco a qualidade da água transportada (neste caso interessa analisar os cenários de menores consumos no início de exploração, com base em simulação dinâmica). Este tipo de simulação permite relacionar as concentrações de alumínio com a velocidade de escoamento, sendo uma fonte de informação decisiva para o planeamento de futuras intervenções ao longo da rede (Figuras 6.23 e 6.24). Quanto **menor a velocidade de escoamento maior é a concentração de alumínio detectada nos nós**.

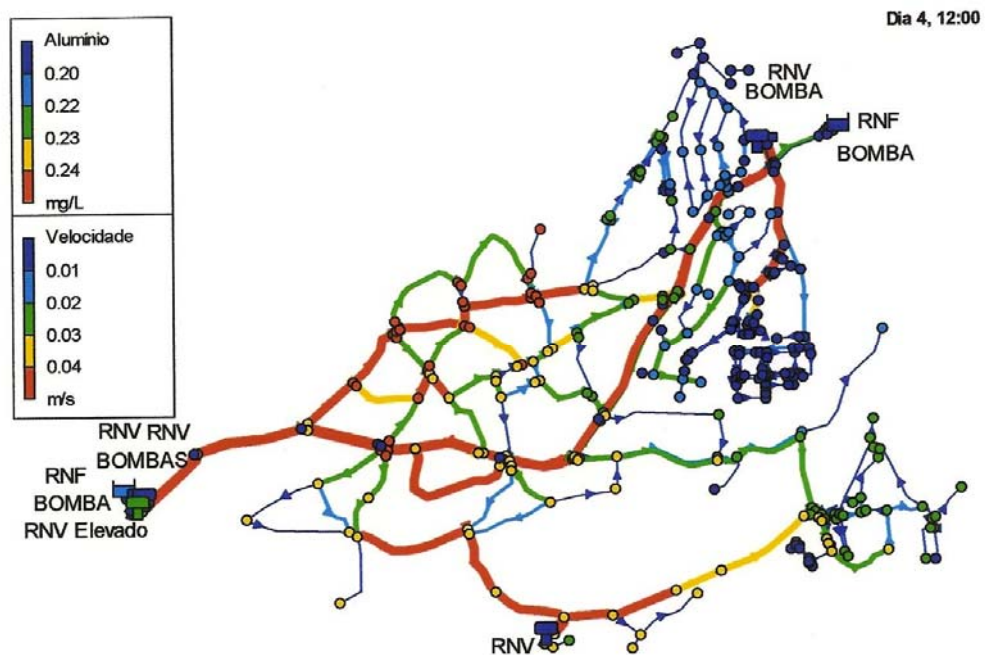


Figura 6.23 – Velocidade de escoamento (tubagens) menor para maior concentração de alumínio (nós).

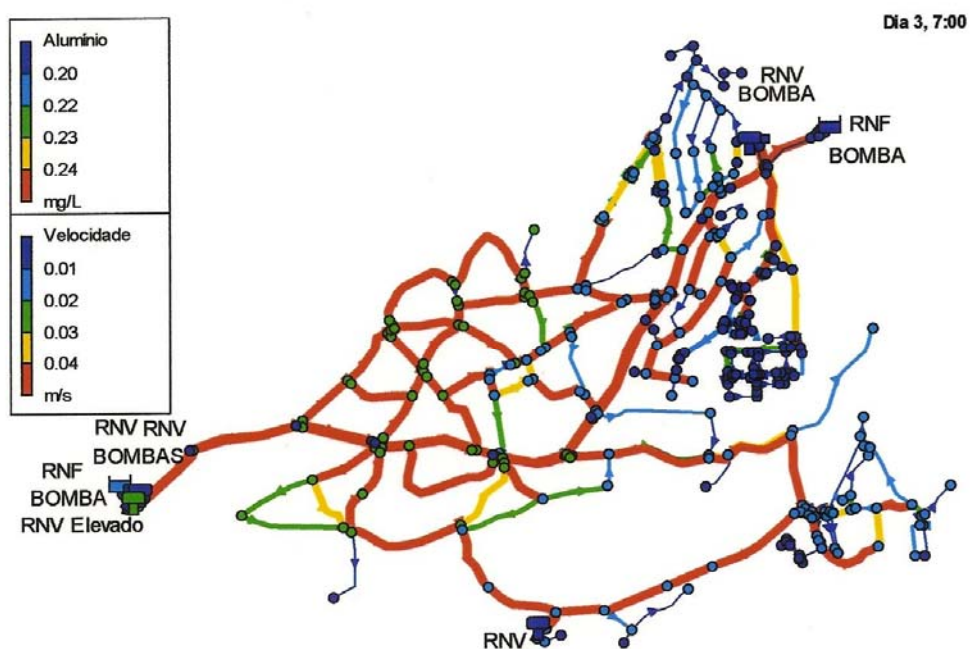


Figura 6.24– Velocidade de escoamento (tubagens) maior para menor concentração de alumínio (nós).

► **Dimensionamento de redes de distribuição e elementos acessórios, em condições normais de funcionamento** - Do ponto de vista de qualidade da água, a rede deve ser dimensionada de forma a garantir o seu fornecimento em condições sanitárias adequadas e a minimizar a necessidade de descargas periódicas.

O controlo das pressões máximas e mínimas que ocorrem na rede pode ser efectuado através de simulações estáticas para os cenários mais desfavoráveis, nomeadamente para o cenário de caudais mínimos e para o cenário de caudal de ponta instantâneo. Para se analisar as flutuações diárias de pressão devem efectuar-se simulações dinâmicas para os cenários de maior consumo.

O dimensionamento da rede de distribuição deve atender aos aspectos de qualidade da água. A análise da capacidade de transporte, em conjunto com a simulação do tempo de percurso para os cenários de baixo consumo, permite analisar os efeitos do sobredimensionamento da rede na qualidade da água. Uma das formas de aumentar a velocidade do escoamento em troços críticos da rede pode ser através do fechamento de algumas válvulas, reduzindo a redundância e aumentando a velocidade (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

► **Análise e dimensionamento do sistema em condições de emergência** - A verificação do comportamento do sistema em condições de emergência é importante para identificar os componentes críticos do sistema (i.e., estações de tratamento, furos, reservatórios, estações elevatórias, condutas principais), aumentar a flexibilização da gestão da rede, minimizando falhas no abastecimento à população, quer em termos quantitativos quer em termos qualitativos, e o tempo necessário para a rede restabelecer as condições normais de funcionamento.

A modelação matemática permite, ao nível do projecto, analisar o comportamento do sistema face a cenários de falha de elementos importantes do sistema em situação de emergência e analisar cenários alternativos de medidas mitigadoras, em termos de alterações da infra-estrutura e de modos de operação. A análise de cenários requer a identificação do componente do sistema candidato a falha e do respectivo cenário de consumos. A verificação da redistribuição de pressões no sistema, em consequência da falha de um componente, pode ser feita através da análise de simulações estáticas. O modo como a rede deve ser operada (i.e., níveis nos reservatórios, estado das bombas e válvulas), o tempo necessário para o restabelecimento das condições normais de funcionamento ou o tempo de propagação de um contaminante devem ser estimados através de simulações em período alargado.

A análise do comportamento da rede em condições de emergência é também importante para a definição de planos de contingência, e permite preparar os operadores para reagirem a um cenário real desta natureza (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

► **Diagnóstico da rede para apoio à reabilitação (inclui análises de expansão de sistemas existentes)** - A análise de problemas de capacidade hidráulica limitada pode ser complementada com simulações em período alargado, para os cenários de maior consumo. O diagnóstico da rede e o estabelecimento de cenários alternativos de reabilitação com vista à melhoria da qualidade da água entregue aos consumidores, podem ser feitos através da simulação da variação do tempo de percurso na rede (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006).

► **Modelação de qualidade da água** - Ao nível do projecto, o tempo de percurso constitui o principal parâmetro de qualidade da água de interesse resultante da modelação. O tempo de percurso é uma variável que depende apenas das características hidráulicas da rede e não requer a introdução de parâmetros adicionais. Permite obter o tempo médio de permanência da água na rede e identificar os locais onde a água permanece mais tempo. Por oposição, a modelação de parâmetros químicos requer, para além do valor da constante de crescimento no seio do escoamento da água entrada no sistema, um conhecimento sobre a forma como este composto cresce ao longo da rede. Longos tempos de retenção em reservatórios conduzem a um aumento significativo nos níveis de alumínio.

Um objectivo implícito do dimensionamento, e posteriormente da operação, de reservatórios é a minimização do tempo de retenção nestas estruturas de armazenamento e da permanência de parcelas de água no seu interior por longos períodos de tempo. A aplicação de simulação permite ao utilizador especificar e testar modelos de mistura nos reservatórios, em função das opções de dimensionamento e dos padrões de enchimento/esvaziamento que ocorrem no interior dos reservatórios, e assim analisar o impacto destes na qualidade da água que chega à rede de distribuição ao longo de uma simulação em período alargado.

A aplicação de simulação recorre a modelos de sistema (black-box models ou input-output models) para simular os processos que ocorrem no interior dos reservatórios e não permite simular o movimento da água dentro de um reservatório. No caso das redes de distribuição, critérios de projecto como sejam a consideração de um diâmetro mínimo ou a criação de malhas devem ser analisados do ponto de vista do seu impacto ao nível dos tempos de percurso. Este tipo de análise deve ser efectuada para os cenários mais desfavoráveis do ponto de vista de qualidade da água (p.ex., simulação dinâmica para um cenário de consumo médio diário, com particular atenção para as horas de menor consumo do dia). Uma solução possível para aumentar o tempo de percurso nas condutas consiste em diminuir o número de ligações redundantes. Esta solução opõe-se, aparentemente, à noção de criação de malhas para aumentar a fiabilidade nas redes de distribuição.

Na realidade a diminuição da redundância numa rede de distribuição pode ser conseguida fechando válvulas estratégicas da rede durante a operação diária da rede. O fecho de válvulas deve procurar minimizar a criação de extremos de rede com caudais reduzidos. Em caso de necessidade, essas válvulas abrem-se para responder a situações anormais, ou a aumentos de consumo (Coelho, Loureiro e Alegre, 2006). Estes tipos de simulação permitem também planear a localização de pontos de intervenção na rede.

6.11 Requisitos regulamentares relativos a pressão

Num sistema de distribuição, as pressões em todos os nós da rede devem estar compreendidas entre um valor máximo e um valor mínimo admissíveis e a superfície piezométrica não deve estar sujeita a variações excessivas ao longo do tempo.

O Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais estabelece que a pressão máxima (estática ou de serviço), em qualquer ponto de utilização, não deve ultrapassar os 600 kPa, medida ao nível do solo.

O regulamento refere ainda que a pressão de serviço em qualquer dispositivo de utilização predial, para o caudal de ponta, não deve ser, em regra, inferior a 100 kPa e que não é aceitável grande flutuação de pressões em cada nó do sistema, impondo-se uma variação máxima ao longo do dia de 300 kPa.

Tipicamente, a diferença entre zonas de pressão varia entre 20 e 40 m.c.a. (Walski et al., 2004).

6.12 Requisitos regulamentares relativos a velocidade de escoamento nas condutas

Um sistema que não apresente velocidades “excessivas” terá um bom desempenho hidráulico. A velocidade e a perda de carga numa conduta relacionam-se, uma vez que a perda de carga é função da velocidade do escoamento.

6.13 Limitação da perda de carga unitária

Alegre (1992) refere que, como ordem de grandeza, valores de perda de carga unitária compreendidos entre 2 e 4 são razoáveis para dimensionar a generalidade dos sistemas de distribuição. Nos grandes sistemas, ou em redes longas, pode ser necessário reduzir este valor para 1, ou até menos. Para pequenos sistemas, em que a rede se desenvolva por área arredondada em torno do ponto de abastecimento, poder-se-ão usar valores da ordem de 5 ou 6 m/km, ou até mais se as velocidades nas condutas não ultrapassarem os limites relativos de segurança ao choque hidráulico. A estimativa da perda de carga máxima numa rede pode ser efectuada admitindo um valor máximo de perda de carga entre cada nó e a origem de abastecimento (Alegre, 1992 aponta para valores de referência inferiores a 10 ou 15 m) e medindo a extensão do percurso correspondente ao nó mais afastado.

6.14 Cenários para minimização da concentração de alumínio na rede

Nas Figuras 6.25 (igual à Figura 6.18) e 6.26, os gráficos representam o **cenário real** com as setas do escoamento e valores do **alumínio às 72 horas, período crítico**.

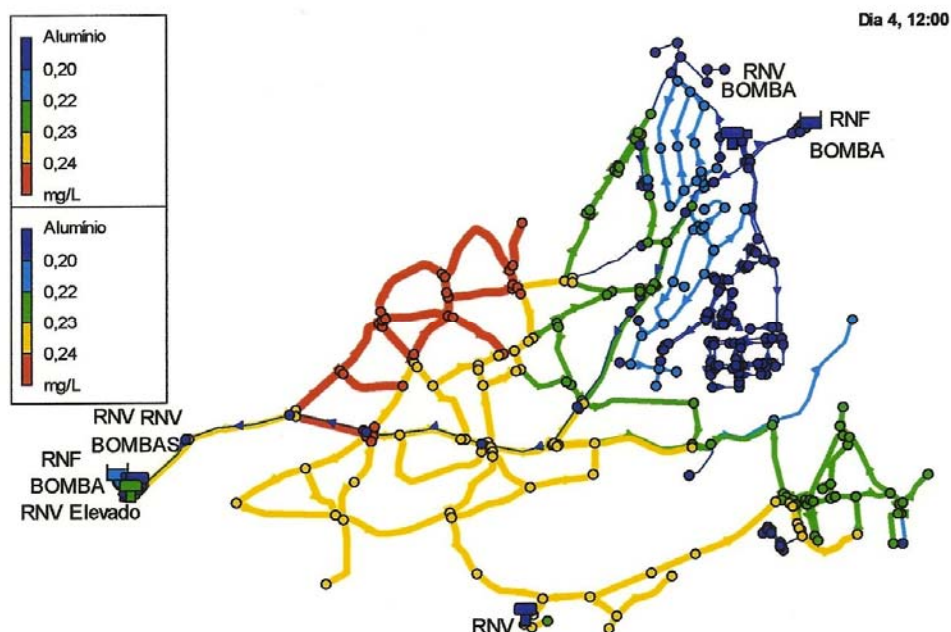


Figura 6.25 – Cenário real com os maiores valores de alumínio.

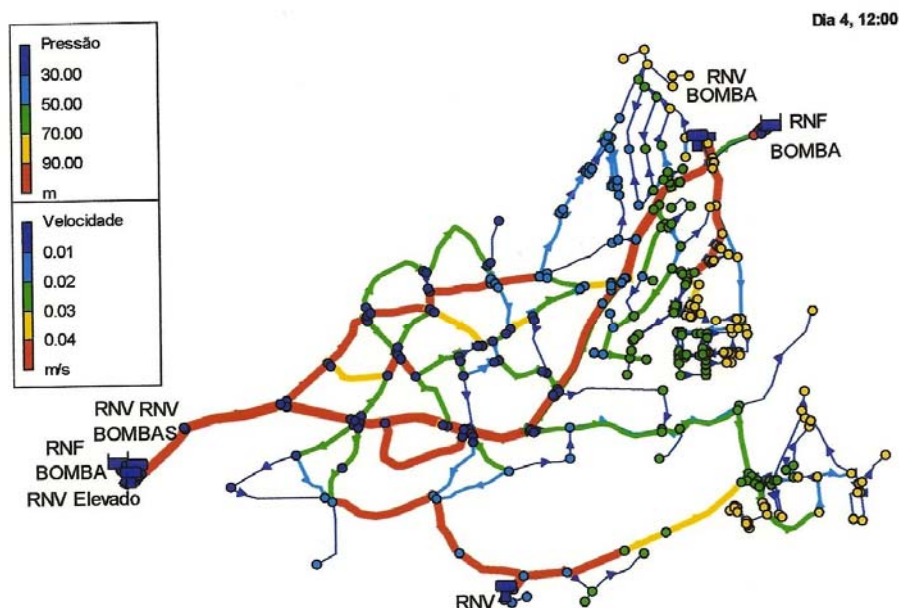


Figura 6.26 – Cenário real para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).

Os gráficos seguintes simulam **extensões de rede** com a criação de tubagens, fecho de válvulas, ampliando-se a zona abastecida pelo RNF 113. Ao longo dos cenários a pressão vai diminuindo excepto no cenário virtual 3 em que a velocidade diminui e a pressão aumenta. O **cenário virtual 2** apresenta a **melhor solução**.

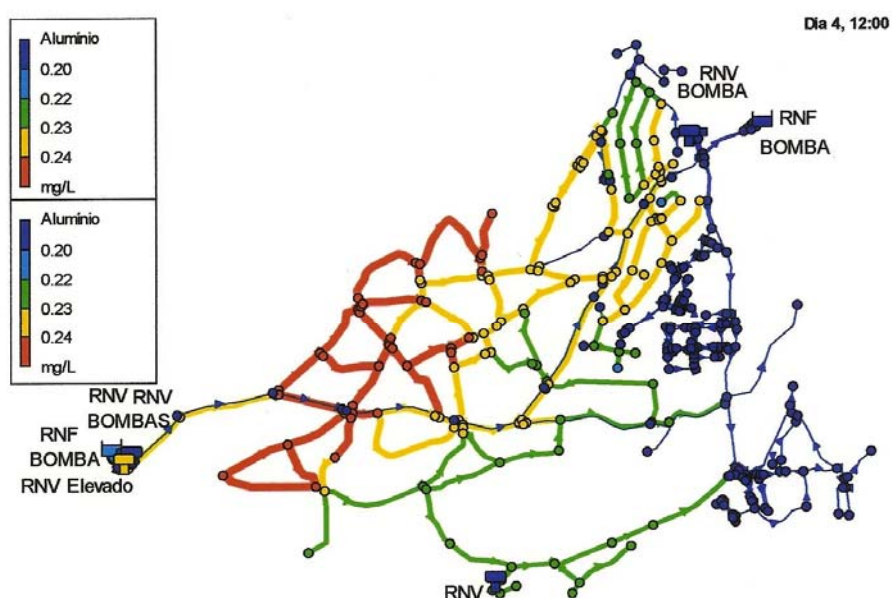


Figura 6.27– Cenário virtual 1: Extensão de rede, ampliando-se a zona abastecida pelo RNF 113.

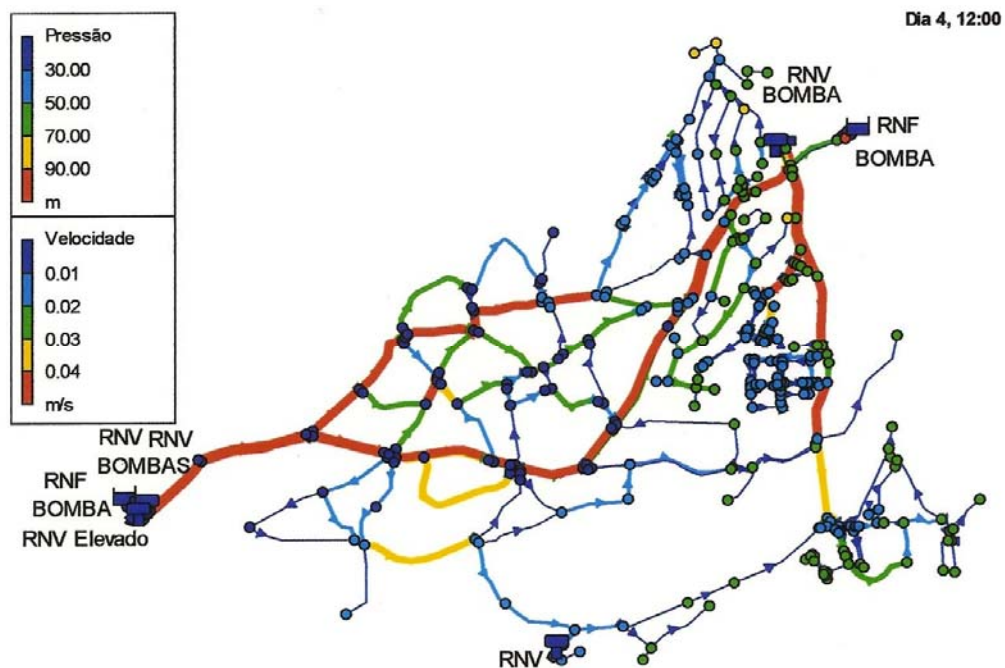


Figura 6.28 – Cenário virtual 1: Extensão de rede para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).

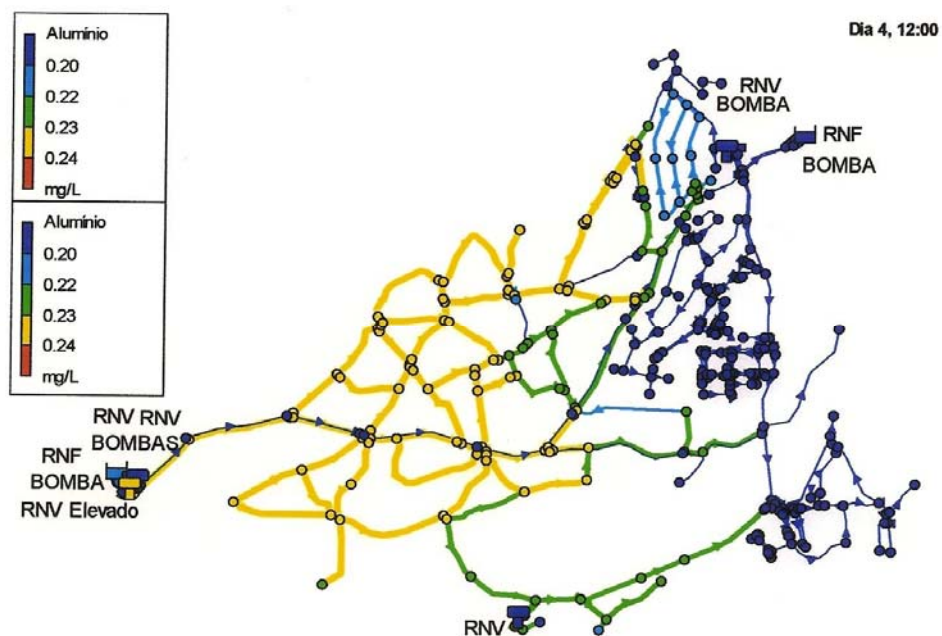


Figura 6.29 – Cenário virtual 2: Extensão de rede, ampliando-se a zona abastecida pelo RNF 113.

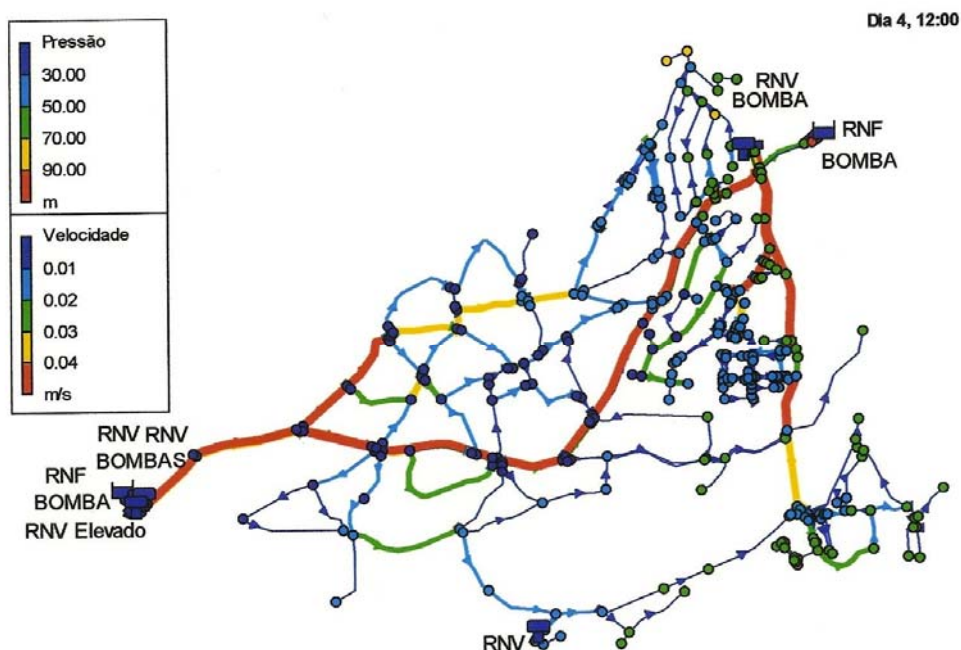


Figura 6.30 – Cenário virtual 2: Extensão de rede para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).

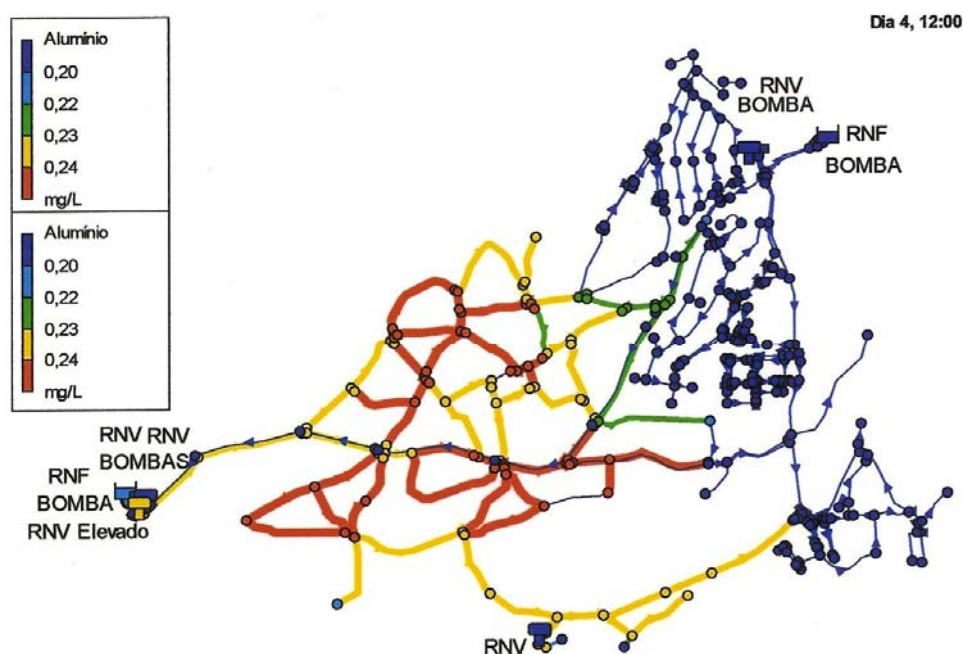


Figura 6.31 – Cenário virtual 3: Extensão de rede com fecho das válvulas 152 e 227, ampliando-se a zona abastecida pelo RNF 113.

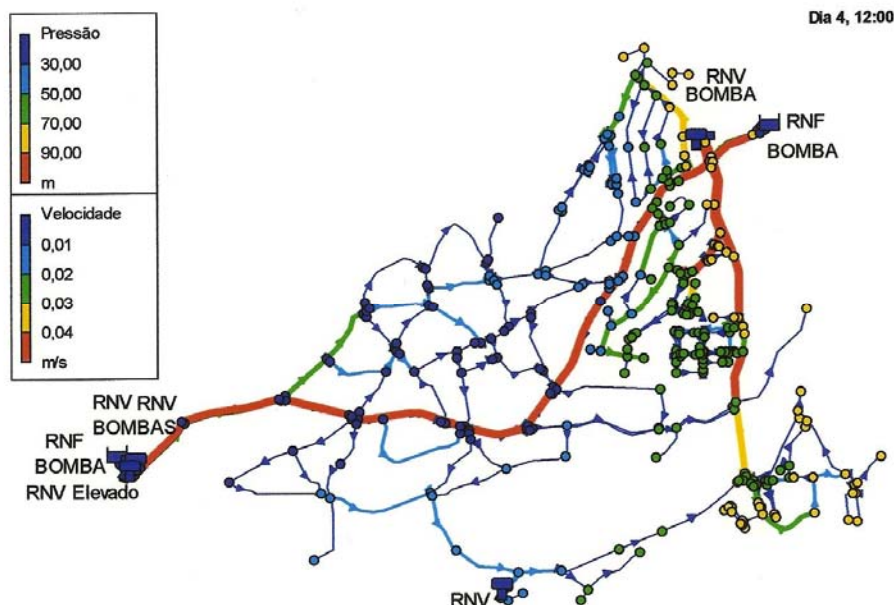


Figura 6.32 – Cenário virtual 3: Extensão de rede com fecho de válvulas para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).

O gráfico que revela as alterações nas **potências** das **bombas** reflecte uma melhoria na qualidade da água. A potência da bomba 1 do furo para o RNV 13 foi diminuída de 15 Kw para 7.5 Kw, as potências das bombas 241 e 242 dos RNV 212 e 213 mantêm-se em 7.5 Kw (a bomba do RNV 212 encontra-se fechada), a potência da bomba 361 do RNF 113 considera-se de 7.5 Kw e a potência da bomba 136 do RNV 217 foi aumentada de 7.5 Kw para 15 Kw.

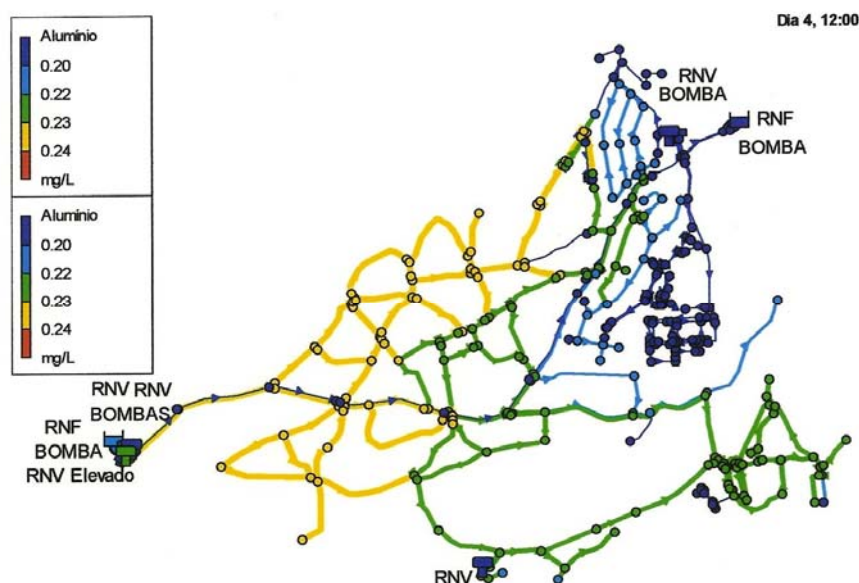


Figura 6.33 – Cenário virtual 4: Alterações nas potências das bombas.

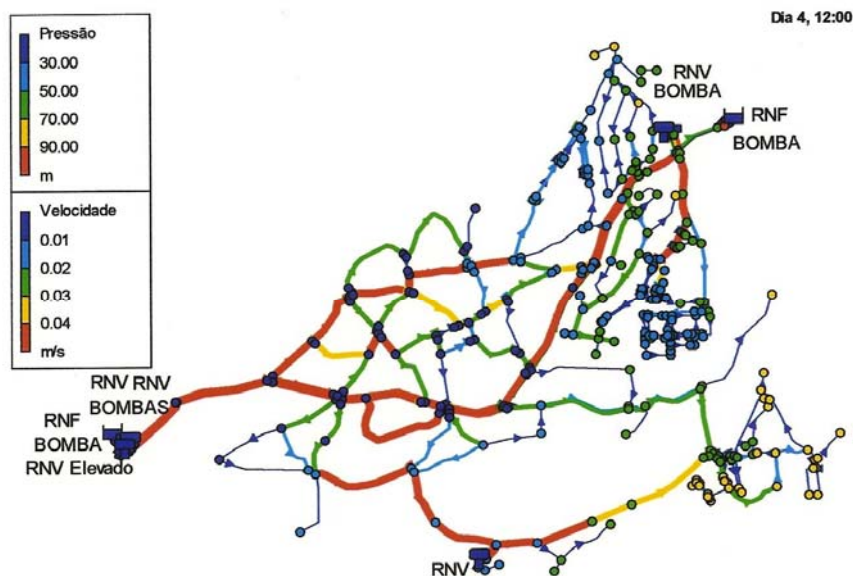


Figura 6.34 – Cenário virtual 4: Alterações nas potências das bombas para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).

O último gráfico simula o **aumento da capacidade do RNV 217** de 10 m³ para 75 m³, a diminuição da potência da bomba 1 que passou de 15 Kw para 7.5 Kw, a abertura da bomba 241 com a potência de 7.5 Kw, o aumento da potência da bomba 136 de 7.5 Kw para 15 Kw, extensão de rede com as válvulas 152 e 227 fechadas. Apesar da diminuição da concentração do alumínio as pressões nalguns pontos da rede são elevadas.

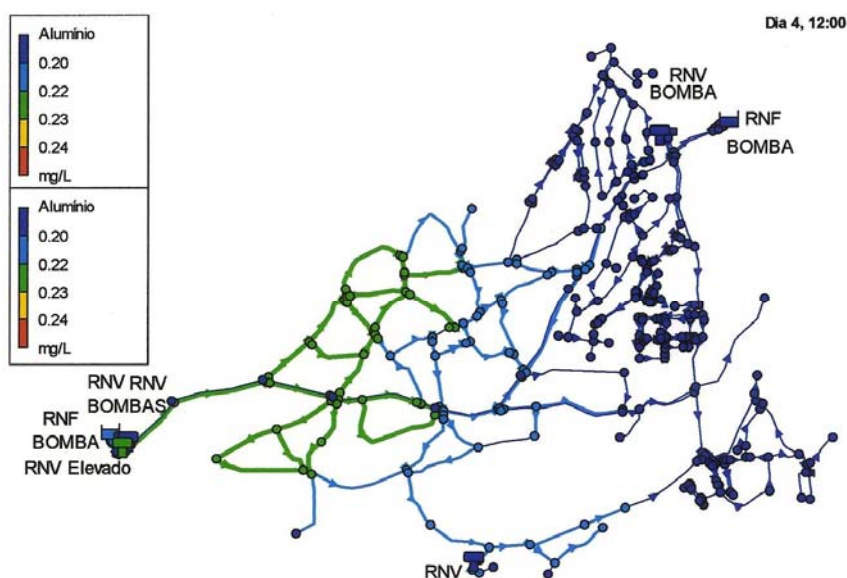


Figura 6.35 – Cenário virtual 5: Aumento da capacidade do RNV 217, alterações nas potências das bombas, extensão de rede com válvulas fechadas.

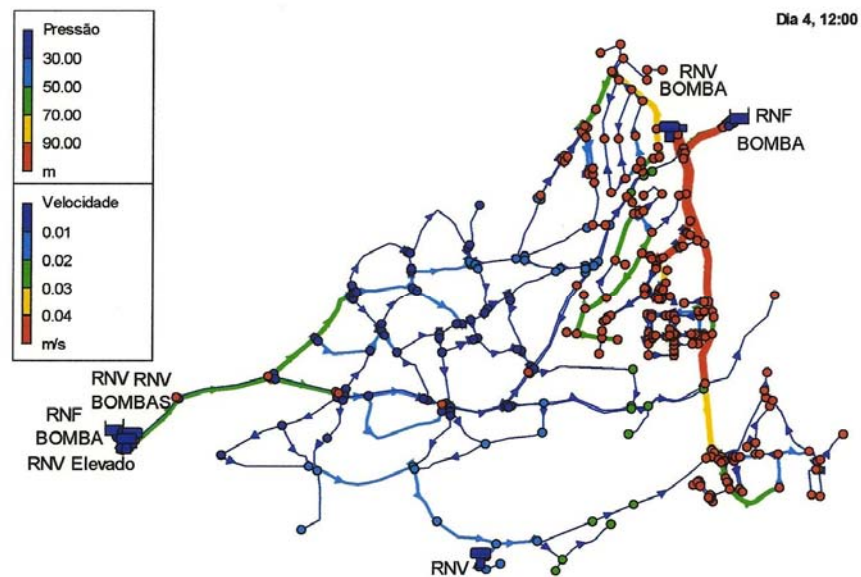


Figura 6.36 – Cenário virtual 5: Aumento da capacidade do RNV 217, alterações nas potências das bombas, extensão de rede com válvulas fechadas, para o período de maior concentração de alumínio (pressão-nós, velocidade-tubagens).

7. CONCLUSÃO

A actual tendência num mercado da água competitivo, cada vez mais orientado para o melhor nível de serviço possível no consumidor, com a melhor gestão possível dos recursos naturais e empresariais, e respeitando o enquadramento legal e regulamentar, é a de progressivamente ir tomando em consideração na mesma base todos os aspectos relevantes da gestão dos sistemas, tanto para efeitos de gestão interna, como de prestação de contas para o exterior.

As entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água têm como preocupação fundamental a necessidade de garantir a potabilidade da água fornecida, não só em termos do enquadramento regulamentar e da saúde pública, mas também no sentido da própria aceitabilidade do seu produto junto do consumidor. O Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de Agosto, estabelece o regime da qualidade da água destinada ao consumo humano, procedendo à revisão do Decreto-Lei n.º 243/2001, de 5 de Setembro, que transpõe para o ordenamento jurídico interno a Directiva n.º 98/83/CE, do Conselho, de 3 de Novembro, tendo por objectivo proteger a saúde humana dos efeitos nocivos resultantes da eventual contaminação dessa água e assegurar a disponibilização tendencialmente universal de água salubre, limpa e desejavelmente equilibrada na sua composição. O alumínio é considerado um parâmetro indicador e o valor paramétrico (VP) é de 200 µg/l, que consiste no valor máximo a controlar. Para concentrações muito superiores ao VP correspondem custos de tratamento elevados. A decantação e filtração permitem eliminar a maior parte do alumínio presente, sob a forma de sais insolúveis. É importante, porém, garantir o controlo do pH e da condutividade da água nas unidades de tratamento e realizar operações sistemáticas de manutenção da rede, através de purgas e de limpeza de reservatórios.

O Epanet é um programa de simulação que ajuda as entidades gestoras de abastecimento de água a produzir e a fornecer água para consumo humano de boa qualidade, contribuindo para a protecção da saúde pública. O uso de modelos de simulação é fundamental para a identificação dos componentes críticos do sistema a reabilitar e para o estabelecimento de cenários alternativos de reabilitação. A simulação deve ser combinada com informação relativa a roturas de condutas, fugas, problemas de qualidade da água e reclamações de clientes. Ao nível da reabilitação, os modelos de simulação assumem um papel fundamental na identificação e minimização de problemas que limitem a capacidade hidráulica do sistema (por exemplo, aumento excessivo dos consumos, tuberculização das tubagens, dimensionamento inadequado de instalações especiais) ou a qualidade da água entregue aos consumidores.

O desenvolvimento da melhor solução apresentada poderá diminuir a concentração de alumínio no sistema público de água. A simulação permitiu compreender o comportamento do alumínio na rede e os procedimentos negativos e positivos, com interesse nas inspecções internas e nos serviços de manutenção.

Algumas considerações devem ser tidas em conta:

- As solicitações a um sistema de abastecimento de água são os consumos de água por parte dos diversos grupos de utilizadores e as perdas físicas de água que ocorrem no conjunto de condutas e restantes componentes. A sua estimativa constitui a tarefa mais difícil e habitualmente mais trabalhosa do processo de desenvolvimento de um modelo de simulação, uma vez que os consumos humanos têm um comportamento de natureza estocástica, tanto no tempo como no espaço, e são invariavelmente a maior fonte de incerteza associada ao modelo.

- O consumo-base concentrado no nó foi especificado em termos de:
 - (i) um valor dimensional, ou seja uma estimativa (em unidades de caudal), para o período em análise, do valor médio do consumo para o conjunto de consumidores cujo consumo é representado pelo nó. A soma de todos estes valores é o consumo médio total da rede. A forma de carregar consumos nos nós consistiu em atribuir a cada nó o consumo-base dimensional, e utilizar padrões de consumo adimensionais, ou seja, cuja média é a unidade (apenas traduz a variação, sem escala). A atribuição de consumos dimensionais aos nós permite uma leitura física directa da magnitude desses valores, sendo os padrões de consumo utilizados para traduzir apenas os comportamentos. Para que seja possível estimar os consumos globais na rede, para um determinado cenário de funcionamento, é necessário dispor-se de um conjunto de registos temporais de caudais e níveis representativos do funcionamento da rede e de informação sobre todos os volumes fornecidos à rede.
- O valor do coeficiente de rugosidade atribuído foi 140 dado que as tubagens são de PVC sem incrustações e 120 para a tubagem 342 que poderá ter incrustações, devido a água medianamente dura, proveniente de outra origem e à idade da tubagem.
- A calibração foi feita com base na comparação entre resultados do modelo e resultados de medições realizadas no sistema físico. Na gestão corrente do sistema tentou-se obter tantas observações quanto possível, e basear a explicação da incerteza remanescente em estimativas razoáveis.
- As possíveis origens de erros constituem um potencial parâmetro de calibração e são as seguintes: coeficiente de rugosidade das condutas, atribuição de consumos aos nós, diâmetro nominal e diâmetro interno, registos de cadastro, erros de conectividade, simplificação da rede, níveis e condições de operação de reservatórios e instalações elevatórias.
- A calibração dos volumes em reservatórios de nível variável (RNV) e das concentrações de parâmetros de qualidade da água coloca particulares exigências numa eficaz distribuição espacial de consumos, e em diagramas de consumo correctamente especificados.
- O modelo hidráulico deverá estar cuidadosamente calibrado, nomeadamente no que diz respeito às perdas de carga unitárias e, de forma crucial, aos consumos a satisfazer.
- A monitorização de parâmetros de qualidade da água foi importante para a calibração dos modelos de qualidade da água e definição de campanhas de amostragem. A monitorização de parâmetros de qualidade da água para efeitos de modelação foi executada por recurso a campanhas temporárias, dirigidas para a área específica em estudo.
- Deve procurar-se uma coincidência não só dos valores das concentrações medidas e simuladas, como do seu comportamento ao longo do tempo. Deve atender-se ao facto do crescimento do alumínio ser essencialmente lento, de forma que para tempos de percurso curtos o comportamento deste parâmetro pode aproximar-se do de um traçador quase conservativo. Assim, será conveniente obter em cada ponto de calibração uma sequência de medições cobrindo várias horas. Não é absolutamente necessário que haja simultaneidade nas medições entre os diversos pontos de calibração, mas deverá existir medição contínua de caudal e do alumínio

no(s) ponto(s) de entrada na rede durante todo o período em que são feitas medições de calibração, de forma a possibilitar a geração de simulações completas.

- Nesta fase não foi possível obter medições de caudais da rede, pelo que os padrões de consumo foram estimados com base em diagramas-tipo de sistemas com características semelhantes.
- O modelo foi desenvolvido para simulação em período alargado, com um único padrão de consumo, por este ser relativamente homogéneo em toda a rede. O Intervalo de Tempo é de 6 horas e os Factores Multiplicativos 0.5, 1.3, 1.0 e 1.2. O consumo máximo dá-se por volta das 6 horas do padrão.
- A exactidão dos modelos de sistemas de adução depende sobretudo da qualidade da descrição das configurações e condições de operação, representadas pela altimetria e níveis máximos e mínimos de reservatórios, alturas e caudais de elevação e regulação de válvulas de operação (sobretudo as válvulas reguladoras de caudal e as válvulas reguladoras de pressão).
- A tolerância a admitir para a diferença entre os valores modelados e os valores medidos de qualquer grandeza não poderá ser inferior à precisão de medição do aparelho com o qual foi efectuada a medição. A excepção a este princípio geral é o caso dos modelos que pretendem simular situações operacionais que pela sua própria natureza não resultam num ciclo repetível dos níveis nos reservatórios, do estado de bombas e válvulas, ou dos parâmetros de qualidade da água, incluindo o tempo de percurso.
- As condições operacionais para as quais se pretende trabalhar deverão estar bem modeladas.
- Se o objectivo da análise passar pela simulação de parâmetros de qualidade da água, é fundamental ter alguma confiança na distribuição espacial de consumos utilizada, pois influenciará directamente os tempos de percurso.
- O primeiro cuidado a verificar para o estabelecimento de um modelo de qualidade da água é a duração mínima necessária para a inicialização da rede com valores ciclicamente estáveis da variável simulada, neste caso o tempo de percurso. Para uma simulação de duração suficientemente longa foi atribuída ao modelo uma idade inicial de 60 horas para os reservatórios de nível fixo (foi introduzido 60 como valor de Qualidade Inicial), determinando-se qual o maior valor do tempo de percurso que ocorre, e em que nó.
- Um modelo de qualidade da água acrescenta, ao modelo hidráulico, equações que traduzem o transporte, mistura e transformação de substâncias que se comportam como estando dissolvidas na água, permitindo assim o cálculo de grandezas como a concentração em qualquer ponto da rede e o tempo de percurso da água entre dois pontos.
- A influência da origem com pouca concentração de alumínio representa-se a partir do circuito hidráulico do RNV 217.
- No estudo de parâmetros não-conservativos, como o alumínio, as respectivas cinéticas deverão estar bem caracterizadas, em relação às reacções na água a circular no sistema em causa.

- A velocidade da reacção é proporcional à concentração de alumínio. Em função dos objectivos pretendidos, podem ser conseguidas estimativas viáveis, recorrendo a medições diferenciais de alumínio na rede, após o conhecimento das características do crescimento no seio da água. Deduzindo a parcela de crescimento no seio da água, obter-se-á uma indicação da importância relativa da parcela do crescimento devida à interacção com a parede. É previsível que a gama testada esteja limitada pela disponibilidade de pontos de amostragem e de medição de caudal.
- Para o Coeficiente de Reacção no Seio do Escoamento foi introduzido o valor 0.1. Este coeficiente pretende traduzir a taxa de crescimento do alumínio devido a reacções na água ao longo do tempo, especificamente para os resultados analíticos obtidos no período estudado, desde Outubro 2009 a Março 2010. Ao RNF 327 foi atribuído o valor 0.20 mg/l na Qualidade Inicial que corresponde ao valor paramétrico estabelecido no Decreto-Lei nº 306/2007, de 27 de Agosto, e ao RNF 113 o valor 0.05 mg/l. Os valores de alumínio do RNF 113 são baixos, constantes e consideraram-se insignificantes relativamente aos do RNF 327.
- No caso de uma tubagem, os dados a inserir para uma simulação de qualidade da água são os seguintes: coeficiente de reacção no seio do escoamento e coeficiente de reacção na tubagem (considerou-se o valor zero).
- A modelação de parâmetros químicos requer, para além do valor da constante de crescimento no seio do escoamento da água entrada no sistema, um conhecimento sobre a forma como este composto cresce ao longo da rede. Longos tempos de retenção em reservatórios conduzem a um aumento significativo nos níveis de alumínio. A mistura e o envelhecimento da água no interior dos reservatórios afectam a qualidade da água.
- Os modelos de qualidade da água simulam três processos fundamentais. Dois desses processos são devidos ao movimento da água, e são consequentemente governados pela hidráulica do sistema: o transporte ou advecção ao longo das condutas, e a mistura completa nos nós de junção. O terceiro processo, que afecta substâncias não-conservativas, é o efeito conjunto de transformação inerente ao contacto e permanência dessa substância na água que circula no sistema, e que se pode dever a reacções com ela própria, com a água e com outras substâncias nela presentes, com o material que compõe as paredes de condutas e órgãos de armazenamento, e com o biofilme, sedimentos e partículas presentes no interior do sistema. Outro processo que poderia ser tomado em consideração é a mistura longitudinal ao longo da direcção do escoamento. No entanto, este processo é normalmente considerado desprezável relativamente ao transporte longitudinal, dados os perfis transversais de velocidades típicos do escoamento de água em pressão e a grande diferença entre as ordens de grandeza do comprimento e do diâmetro de uma conduta (Grayman et al., 1988, Liou and Kroon, 1987, 1988).
- A totalidade das reacções que ocorrem, assim como os respectivos mecanismos e velocidades, não são ainda hoje conhecidos mas, em geral, as reacções com as espécies inorgânicas são mais rápidas do que com as espécies orgânicas. A velocidade com que cada uma destas reacções ocorre é função da espécie em causa e o seu estado de oxidação, e de outros factores como as concentrações dos reagentes envolvidos, o pH e a temperatura da água.

Os principais factores estudados que influenciam a dissolução do alumínio são a velocidade da água na conduta, tempo de retenção nos reservatórios e na rede, e pH. As velocidades baixas no período nocturno, em todo o sistema, e nas zonas terminais podem acarretar a ocorrência de problemas de estagnação e de sedimentação. À medida que o pH baixa, a solubilidade do alumínio aumenta e os seus teores podem tornar-se mais elevados.

A causa do aparecimento de alumínio é a sua concentração na água do furo que abastece o RNV elevado, que degrada a sua qualidade, por processos de pós-floculação que provocam, além de uma turvação e de uma cor anormais, depósitos nas canalizações. O teor de alumínio da água tratada aumenta desde a captação até à torneira do consumidor, devido a reacções que ocorrem no seio da água, nos RNV, quer na interface com as paredes dos componentes do sistema. Na Figura 6.18 visualizam-se os níveis de alumínio na rede e às 72 horas, onde se encontram zonas críticas de maior concentração. O Relatório de Reacção, apresentado na Figura 6.19, para a simulação referida expõe o gráfico de resultados que mostra, em termos médios, a quantidade de alumínio nas tubagens (3.29%), nos RNV (96.71%) e na parede (0%).

Os maiores caudais encontram-se na adutora para os RNV 212 e 213 e na distribuidora à saída do RNV 13. Os caudais mínimos encontram-se principalmente nas zonas terminais.

A perda de carga para o período de maior consumo considerado foi no dia 3 às 9 horas.

A pressão mínima na hora de maior consumo estudada é a indicada para o dia 3 às 7 horas. A análise das pressões máximas deve ser feita para os cenários de baixo consumo, como se apresenta na Figura 6.20.

As Figuras 6.10 e 6.11 apresentam o pior cenário, para as 72 horas, nas quais para os nós sem consumo o tempo de percurso cresce continuamente, por não circular através deles qualquer caudal. É necessário garantir que os tempos de percurso não são excessivamente elevados, pondo em risco a qualidade da água transportada. Este tipo de simulação permite relacionar as concentrações de alumínio com a velocidade de escoamento, sendo uma fonte de informação decisiva para o planeamento de futuras intervenções ao longo da rede. Quanto menor a velocidade de escoamento maior é a concentração de alumínio detectada nos nós. O problema dos longos tempos de percurso é também frequentemente encontrado nos sistemas de distribuição, nomeadamente nas zonas ramificadas terminais com baixos consumos, a que corresponderão velocidades de escoamento baixas.

O tempo de percurso é outro dos resultados dos modelos de qualidade da água que se prestam a uma significativa avaliação do desempenho, no que se refere ao teste de vulnerabilidade do sistema a um acidente de contaminação ou falha de tratamento. Neste caso, o tempo de percurso é classificado de acordo com a capacidade de resposta da entidade gestora. Quanto mais tempo a água demorar a chegar aos nós de consumo, maior probabilidade existe em avisar o consumidor atempadamente.

O Epanet ajudou a analisar estratégias alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade da água do sistema, tendo em conta que um sistema que não apresente velocidades e pressões “excessivas” terá um bom desempenho hidráulico, através de, por exemplo:

- alterações na utilização de origens de água num sistema com múltiplas origens, nomeadamente em extensões de rede com a criação de tubagens, fecho de válvulas, ampliando-se a zona abastecida pelo RNF 113. Ao longo dos cenários a pressão vai diminuindo excepto no cenário virtual 3 em que a velocidade diminui e a pressão aumenta. O cenário virtual 2 apresenta a melhor solução.

- alteração de esquemas de funcionamento de grupos elevatórios e enchimento/esvaziamento de reservatórios de nível variável:
 - alterações nas potências das bombas que reflectem uma melhoria na qualidade da água. A potência da bomba 1 do furo para o RNV 13 foi diminuída de 15 Kw para 7.5 Kw, as potências das bombas 241 e 242 dos RNV 212 e 213 mantêm-se em 7.5 Kw (a bomba do RNV 212 encontra-se fechada), a potência da bomba 361 do RNF 113 considera-se de 7.5 Kw e a potência da bomba 136 do RNV 217 foi aumentada de 7.5 Kw para 15 Kw.
 - o aumento da capacidade do RNV 217 de 10 m³ para 75 m³, a diminuição da potência da bomba 1 que passou de 15 Kw para 7.5 Kw, a abertura da bomba 241 com a potência de 7.5 Kw, o aumento da potência da bomba 136 de 7.5 Kw para 15 Kw, a extensão de rede com as válvulas 152 e 227 fechadas permitiram a diminuição da concentração do alumínio apesar das pressões nalguns pontos da rede serem elevadas.
- selecção de pontos de intervenção na rede: purgas nos reservatórios e zonas terminais, limpeza e substituição de tubagens.
- tomada de decisão informada sobre a escolha dos pontos de amostragem: no caso de ocorrência de um potencial problema de qualidade, a amostragem regular poderia não ser capaz de identificá-lo. Com o benefício do modelo, parece evidente que os nós 29, 93, 103, 108 e 296 poderão ser significativos para o propósito de identificar efeitos de tempo de percurso excessivo.
- A diminuição da redundância numa rede de distribuição pode ser conseguida fechando válvulas estratégicas da rede durante a operação diária da rede. O fecho de válvulas deve procurar minimizar a criação de extremos de rede com caudais reduzidos.

As possíveis soluções, para minimizar a concentração do alumínio no sistema de distribuição, poderão passar pelo aumento da introdução de água da origem com valores de alumínio aceitáveis, extensão da rede com a água de melhor qualidade e execução de descargas/purgas nas zonas onde apresentam maior concentração de alumínio.

Com a actual ênfase nos requisitos de qualidade da água, os quadros regulamentares cada vez mais exigentes, os crescentes custos de tratamento e manutenção de qualidade da água, e a visibilidade dos problemas de qualidade da água junto dos consumidores e agentes sociais, a modelação de qualidade da água deverá progressivamente desempenhar um papel central no planeamento, projecto e controlo operacional de sistemas de distribuição.

De acordo com a legislação ambiental, cabe às entidades gestoras conceber e implementar acções que conduzam a um equilíbrio entre as actividades humanas e a capacidade dos sistemas naturais para suportar e garantir níveis ambientais aceitáveis. Para cumprir este objectivo é necessária informação de base e suporte técnico para a resolução de problemas ambientais, que permitam construir conhecimento científico a uma adequada gestão dos recursos ecológicos, à compreensão do modo como os poluentes podem afectar a saúde pública, e à prevenção ou minimização de futuros riscos ambientais.

8. BIBLIOGRAFIA

Alegre, H. (1992) – Ferramentas de apoio à gestão técnica de sistemas de distribuição de água urbanos. Tese, Instituto Superior Técnico e LNEC, Lisboa, Portugal.

Alegre, H., Coelho, S. T. (1998) – Princípios Relevantes para a Eficiente Gestão Técnica de Sistemas de Abastecimento de Água. Anais do 8º Encontro Nacional de Saneamento Básico, 27-30 Outubro, Barcelos, Portugal.

Awwa (1990) – Water Quality and Treatment-A handbook of community water supplies. 4.^a Ed. McGraw-Hill. New York.

Awwa (1999) – Water Quality and Treatment-A handbook of community water supplies. 5.^a Ed. McGraw-Hill. New York.

Bratby, J. (1980) – Coagulation and Flocculation. Croydon. Uplands Press Ltd. England.

Broekaert, J.A.C., Güçer, Ş., Adams, F. (1989) – Metal Speciation in the Environment. Berlin, Springer.

Cárcomo Lobo Ferreira, J. P. (1983) – Introdução à Contaminação de Águas Subterrâneas. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Coelho, S.T. (1997) – Performance in water distribution: a system's approach, Research Studies Press, Reino Unido.

Coelho, Sérgio Teixeira, Loureiro, Dália, Alegre, Helena (2006) – Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água. Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Lisboa, Portugal.

Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de Agosto. D.R: I Série – Regime da qualidade da água destinada ao consumo humano.

Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de Agosto. D.R: I Série – Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais.

Dianati, T. e Ramazan, A. (2003) – Study on the removal of Cadmium from water environment by adsorption on GAC, BAC and Biofilter. Difuse Pollution Conference, Dublin.

Eckenfelder, Jr. W. (1979) – Principles of water quality management. Boston, CBI Publ. Company, Inc.

Eckenfelder, W. W. (2000) – Industrial water pollution control. 3.^a ed. McGraw-Hill. Boston.

G. Manuppella, G. Zbyszewski, O. Da Veiga Ferreira (1978) – Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 23-A, Pombal. Lisboa, Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos.

Genç-Fuhrman, H., Mikkelsen, P. S. e Ledin, A. (2007) – Simultaneous removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from storm-water: experimental comparison of 11 different sorbents. *Water Research*, 41 (3), p. 591-602.

George, S., Pandit, P., Gupta, A. (2010) – Residual aluminium in water defluoridated using activated alumina adsorption – Modeling and simulation studies. *Water Research*. 2010, 44, 3055-3064

Grayman, W.M., Clark, R.M., Males, R.M. (1988) - Modeling distribution-system water quality: dynamic approach, *J. Water Resources Planning and Management*, EUA.

Huang, W., Chen, C. Y. e Peng, M. Y. (2004) – Adsorption/reduction of bromate from drinking water using GAC: effects on carbon characteristics and long-term pilot study. *Water SA*, 30, p. 369-375.

Kanokkantapong, V. e Jiradecha, C. (2005) – Enhancing aluminium and iron adsorption on the modified granular activated carbon by permanganate ion. *Thai Environmental Engineering Journal*, 19 (1), p. 29-39.

Lide, D. R. (1990) – Handbook of Chemistry and Physics. CRC press, 71.^a ed. (8.16-8.23).

Liou, C.P., Kroon, J.R. (1987) – Modeling the propagation of waterborne substances in distribution networks, *J. American Water Works Association*, November 1987, EUA.

Liou, C.P., Kroon, J.R. (1988) – Discussion of Grayman, W.M., Clark, R.M., Males, R.M. (1988), EUA.

Marhaba, T. (2000) – Examining bromate ion removal by GAC through RSSCT and pilot scale columns. *Environmental Engineering and Policy*, 2, p. 59-64.

Mendes, Benilde, Santos Oliveira, J. F. (2004) – Qualidade da água para consumo humano. Lisboa, Portugal.

Poças, Ana (2008) – Fouling of a drinking water system in relation to hydraulic circumstances and customer complaints, Tese de Mestrado, Lisboa, Portugal.

Ramade, F. (1987) – Les Catastrophes écologiques. Paris, McGraw-Hill.

Reimann, C.; Caritat, P. (1998) – Chemical Elements in the Environment. Berlin, Springer-Verlag.

Rogers, H. R., Norris, M. W., James, H. A. (2004) – Effects of materials of construction on tastes and odours in drinking water. *Environmental Science & Bio/Technology* 3: 23-32.

Rosa, M. J., Campinas, M., Soares, S. e Cecílio, T. (2007) – Alterações tecnológicas a implementar na linha de tratamento para cumprimento da nova legislação relativa à qualidade de água para consumo humano. *Tecnologia da Água*, Edição II, 49, p. 18-31.

Rosa, Maria João, Vieira, Paula, Menaia, José (2009) – O tratamento de água para consumo humano face à qualidade da água de origem. Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Lisboa, Portugal.

Rossman, Lewis A. (Autoria) (2002), Loureiro, Dália, Coelho, Sérgio Teixeira (Tradução e Adaptação) (2004) – Manual do utilizador do Epanet 2.0, Simulação hidráulica e de parâmetros de qualidade em sistemas de transporte e distribuição de água. Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Lisboa, Portugal.

Serrano, José António P.F., Garcia, Paula Cristina S. (1997) – Piezometria da Região Centro. Direcção Regional do Ambiente e Recursos Naturais do Centro, Direcção de Serviços da Água, Divisão dos Recursos Hídricos, Coimbra.

Stuk (2000) – Treatment techniques for removing natural radionuclides from drinking water. Stuk-Radiation and Nuclear Safety Authority. Helsinki.

Vieira, P. (2001) – “Decaimento do Cloro em Sistemas de Distribuição de Água para Consumo Humano”, Tese de Mestrado, Lisboa, Portugal.

Vieira, P. Coelho, S. T. (2000) – “Decaimento do Cloro em Sistemas de Distribuição de Água”, Anais do 5º Congresso da Água (em CD-Rom), 25-29 Outubro, Lisboa, Portugal.

Vieira, P., Rosa, M. J. e Alegre, H. (2007) – Estações de tratamento de água para consumo humano em Portugal. ITH 44. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A. (2003) – Advanced Water Distribution Modeling. Haestad Methods Press, EUA (www.haestad.com).

Who (2006) – Guidelines for drinking-water quality, First addendum to third edition, Volume 1, Recommendations. World Health Organization. Geneva.

Zhao, H., Hu, C., Liu, H., Zhao, X., Qu, J. (2008) – Role of Aluminum Speciation in the Removal of Disinfection Byproduct Precursors by a Coagulation Process. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42, 5752-5758.

Zhao, H., Liu, H., Hu, C., Qu, J. (2009) – Effect of Aluminum Speciation and Structure Characterization on Preferential Removal of Disinfection Byproduct Precursors by Aluminum Hydroxide Coagulation. *Environ. Sci. Technol.* 2009, 43, 5067-5072.

SÍTIOS DA INTERNET:

www.apambiente.pt

www.arhcentro.pt

www.ersar.pt

www.inag.pt

www.ipq.pt

www.sniturh.pt

ANEXOS

ANEXO A: FUNDAMENTOS DA TEORIA DE MODELAÇÃO MATEMÁTICA

FUNDAMENTOS DA TEORIA DE MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Cálculo da advecção, mistura e transformação de parâmetros de qualidade da água

As equações que o EPANET utiliza para obter uma solução de qualidade da água baseiam-se nos princípios da conservação da massa, conjugados com leis cinéticas de reacção.

O módulo de simulação de qualidade da água do EPANET permite acompanhar o crescimento ou o decaimento de uma substância devido a reacções, à medida que esta se desloca ao longo da rede. Para tal, é necessário conhecer-se a taxa de reacção e o modo como esta pode depender da concentração da substância. As reacções podem ter lugar no seio do escoamento, entre espécies químicas presentes na água, ou na interface com as paredes das tubagens ou dos reservatórios de nível variável. Reacções no seio do escoamento podem ocorrer também no interior de reservatórios de nível variável.

1. Transporte por advecção em tubagens

Uma substância dissolvida é transportada ao longo de uma tubagem com a mesma velocidade média do escoamento, sujeita a uma determinada taxa de reacção (crescimento, decaimento). A dispersão longitudinal é um mecanismo de transporte usualmente pouco importante para a maioria das condições operacionais. Significa, portanto, que se admite não existir mistura de massas entre segmentos adjacentes que se deslocam ao longo da tubagem. Assim, desprezando a dispersão longitudinal, obtém-se a seguinte equação de advecção com reacção:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i)$$

em que C_i = concentração (massa/volume) na tubagem i em função da distância x e do tempo t , u_i = velocidade média do escoamento (comprimento/tempo) na tubagem i e r = taxa de reacção (massa/volume/tempo), função da concentração.

2. Mistura nos nós

Assume-se que nos nós que recebem caudal de duas ou mais tubagens ocorre mistura completa e instantânea. Deste modo, a concentração de uma substância contida no seio do escoamento que sai do nó pode ser obtida simplesmente através de um balanço de massas. Assim, pode escrever-se a seguinte equação para um nó específico:

$$C_{i/x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j C_{j/x=L_j} + Q_{k,ext} C_{K,ext}}{\sum_{j \in I_k} Q_j + Q_{k,ext}}$$

em que i = troço com caudal que sai do nó k , I_k = conjunto de troços com caudal que convergem em K , L_j = comprimento do troço j , Q_j = caudal (volume/tempo) no troço j , $Q_{k,ext}$ = origem externa de caudal que entra na rede através do nó k e $C_{k,ext}$ = concentração externa de caudal que entra no nó k . A notação $C_{i/x=0}$ representa a concentração no início do troço i , enquanto que $C_{i/x=L}$ é a concentração no final do troço.

3. Mistura nos reservatórios

A hipótese de base para o cálculo da concentração em reservatórios (RNVs e RNFs) consiste em assumir que ocorre mistura completa e instantânea nos volumes de água. Esta é uma hipótese razoável para muitos RNFs que operam em condições de enchimento-esvaziamento, desde que seja fornecido um fluxo suficiente ao reservatório. Em condições de mistura completa, a concentração num RNV resulta da mistura do conteúdo do RNV com o caudal que entra. Ao mesmo tempo, a concentração interna pode ser alterada devido a reacções de decaimento ou crescimento. A equação seguinte traduz este fenómeno:

$$\frac{\partial (V_s C_s)}{\partial t} = \sum_{i \in I_s} Q_i C_{i/x=Li} - \sum_{j \in O_s} Q_j C_s + r(C_s)$$

em que V_s = volume armazenado no instante t , C_s = concentração na estrutura de armazenamento, I_s = conjunto de troços que fornecem caudal à estrutura de armazenamento e O_s = conjunto de troços que recebem caudal da estrutura de armazenamento.

4. Reacções no seio do escoamento

Enquanto uma substância é transportada ao longo de uma tubagem, ou permanece num RNV, pode reagir com outros constituintes químicos presentes no seio da água. A taxa de reacção pode ser descrita genericamente em termos da concentração elevada à potência n :

$$R = kC^n$$

em que k = coeficiente de reacção no seio do escoamento e n = ordem da reacção. Quando existe uma concentração que limita o crescimento ou o decaimento último de uma substância, a taxa de reacção pode ser traduzida através da seguinte expressão:

$$R = K_b (C_L - C) C^{(n-1)} \quad \text{para } n > 0, K_b > 0$$

$$R = K_b (C - C_L) C^{(n-1)} \quad \text{para } n > 0, K_b < 0$$

em que C_L = concentração limite.

Apresentam-se seguidamente diferentes expressões para o cálculo da taxa de reacção instantânea (R):

► Decaimento de 1ª ordem simples ($C_L = 0$, $K_b < 0$, $n = 1$): $R = K_b C$

► Crescimento de 1ª ordem saturado ($C_L > 0$, $K_b > 0$, $n = 1$): $R = K_b (C_L - C)$

Este modelo pode ser utilizado para modelar o crescimento de subprodutos de desinfecção, como sejam os trihalometanos, em que a formação última de subprodutos (C_L) é limitada pela quantidade de material reactivo presente.

► Decaimento de 2ª ordem – Dois componentes ($C_L \neq 0$, $K_b < 0$, $n = 2$):

$$R = K_b C(C - C_L)$$

Este modelo assume que a substância A reage com a substância B a uma taxa desconhecida para produzir o produto P. A taxa de consumo de A é proporcional ao produto de A e B remanescente. CL pode ser positivo ou negativo, dependendo de o componente A ou B estar ou não em excesso, respectivamente.

► Cinética de Decaimento de Michaelis-Menton ($CL > 0$, $K_b < 0$, $n < 0$):

$$R = \frac{K_b C}{C_L - C}$$

No caso particular de ser especificado um valor negativo para a ordem n da reacção, o EPANET utilizará a equação de reacção de Michaelis-Menton para uma reacção de decaimento. (Para reacções de crescimento, o denominador passa a ser $CL + C$). Esta equação de reacção é usualmente utilizada para descrever reacções do tipo enzima-catalisador ou crescimento microbiano. Produz um comportamento de primeira ordem para baixas concentrações e um comportamento de ordem zero para elevadas concentrações. Note-se que, para reacções de decaimento, CL deverá ser superior à concentração inicial que se verificar.

► Crescimento de Ordem Zero ($CL = 0$, $K_b = 1$, $n = 0$)

$$R = 1.0$$

Esta equação particular pode ser utilizada para modelar a idade da água onde, por cada unidade de tempo, a “concentração” (p.ex., idade) aumenta de uma unidade.

A relação entre o coeficiente de reacção no seio do escoamento a uma temperatura T1 e o respectivo valor a uma temperatura T2 é usualmente modelada através da equação de Van't Hoff – Arrhenius:

$$K_{b2} = K_{b1} \theta^{T2-T1}$$

em que θ é uma constante.

Os coeficientes de reacção no seio do escoamento usualmente crescem com o aumento da temperatura.

5. Reacções na parede da tubagem

Durante o mecanismo de transporte nas tubagens, as substâncias dissolvidas podem ser transportadas para a parede da tubagem e reagir com materiais, como sejam os produtos de corrosão ou biofilme, que se encontrem junto ou na parede da tubagem. A área de tubagem disponível para reacção e a taxa de transferência de massa entre o seio do escoamento e a parede também influenciam a taxa de reacção. O raio hidráulico, que para uma tubagem é igual ao raio a dividir por dois, determina o factor de forma. O efeito de transferência de massa pode ser representado por um coeficiente de transferência de massa, cujo valor depende da difusão molecular das espécies reactivas e do número de Reynolds do escoamento. Para leis cinéticas de 1ª ordem, a taxa de reacção na tubagem pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$r = \frac{2K_w K_f C}{R(K_w + K_f)}$$

em que K_w = coeficiente de reacção na parede (comprimento/tempo), K_f = coeficiente de transferência de massa (comprimento/tempo) e R = raio da tubagem. Para cinéticas de ordem zero, a taxa de reacção não pode ser superior à taxa de transferência de massa.

$$r = \text{MIN}(K_w, K_f C)(2 / R)$$

em que K_w tem agora as unidades de massa/área/tempo.

Os coeficientes de transferência de massa são usualmente expressos em termos do número adimensional de Sherwood (Sh):

$$K_f = Sh \frac{D}{d}$$

em que D = difusão molecular da espécie a ser transportada (comprimento²/tempo) e d = diâmetro da tubagem. Em regime laminar, o número de Sherwood médio ao longo do comprimento de uma tubagem pode ser expresso do seguinte modo

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668(d/L)ReSc}{1 + 0.04[(d/L)ReSc]^{2/3}}$$

em que Re = número de Reynolds e Sc = número de Schmidt (viscosidade cinemática da água a dividir pela difusão molecular do químico). Para escoamento turbulento, a correlação empírica de Notter e Sleicher (1971) pode ser utilizada:

$$Sh = 0.0149Re^{0.88} Sc^{1/3}$$

6. Algoritmo lagrangeano de transporte

O simulador de qualidade da água do EPANET utiliza o método lagrangeano para seguir o destino de parcelas discretas de água (modelados como segmentos), à medida que estas se deslocam nas tubagens e se misturam nos nós, entre passos de cálculo com comprimento fixo.

Um passo de cálculo de qualidade da água deve ser tipicamente mais pequeno que o passo de cálculo de hidráulica (p.ex., minutos em vez de horas) para ter em conta pequenos tempos de percurso que possam ocorrer nas tubagens.

À medida que o tempo avança, o tamanho do segmento mais a montante na tubagem aumenta com a entrada de água, enquanto que uma igual perda de tamanho ocorre no segmento mais a jusante à medida que a água sai da tubagem. O tamanho dos segmentos intermédios permanece inalterado.

Os seguintes passos ocorrem no final de cada passo de cálculo:

1. A qualidade da água em cada segmento é actualizada de modo a reflectir qualquer reacção que possa ter ocorrido ao longo do passo de cálculo.
2. A água que entra em cada nó proveniente de parcelas de água de várias tubagens com caudal é misturada com o caudal externo (se existir) para calcular um novo valor de concentração da água no nó. A contribuição do volume proveniente de cada segmento é igual ao produto do caudal na tubagem pelo passo de cálculo. Se este produto exceder o volume do segmento, o segmento é destruído e o próximo segmento (aquele que se lhe segue na tubagem) começa a contribuir com o seu volume.

3. Contribuições de origens externas são adicionadas aos valores de qualidade nos nós. A concentração em RNVs é actualizada dependendo do método utilizado para modelar a mistura em cada RNV.
4. Novos segmentos são criados em tubagens com o caudal que sai de cada nó, RNF e RNV. O volume do segmento é igual ao produto do caudal na tubagem pelo passo de cálculo. A concentração no novo segmento é igual ao novo valor de concentração no nó.

Para reduzir o número de segmentos, o passo 4 é apenas executado se a nova concentração no nó diferir do valor da concentração no último segmento da tubagem de saída, dentro de uma tolerância previamente especificada. Se a diferença na concentração estiver abaixo da tolerância especificada, o tamanho do último segmento da tubagem de saída é simplesmente aumentado de um volume correspondente ao produto do caudal na tubagem pelo passo de cálculo respectivo.

Este processo é repetido para o próximo passo de cálculo de qualidade da água. No início do próximo passo de hidráulica, a ordem dos segmentos em troços cujo caudal tenha invertido o sentido é trocada. Inicialmente, cada tubagem na rede é composta por um único segmento, cuja concentração é igual à concentração inicial no nó de montante.

ANEXO B. TABELAS DA REDE: NÓS – COTA, CONSUMO-BASE, QUALIDADE INICIAL E TROÇOS – COMPRIMENTO, DIÂMETRO, RUGOSIDADE E COEFICIENTE DE REACÇÃO NO SEIO DO ESCOAMENTO

Tabela da Rede - Nós

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 1	130	0	0
Nó 2	127	0.029	0
Nó 3	128	0	0
Nó 4	128	0.025	0
Nó 5	127	0	0
Nó 6	127	0.009	0
Nó 7	126	0	0
Nó 8	125	0.013	0
Nó 9	125	0.009	0
Nó 10	126	0	0
Nó 11	126	0	0
Nó 14	128	0.097	0
Nó 15	126	0	0
Nó 16	126	0.028	0
Nó 17	126	0	0
Nó 18	122	0	0
Nó 19	126	0.005	0
Nó 12	125	0	0
Nó 20	125	0	0
Nó 21	125	0	0
Nó 22	125	0.029	0
Nó 23	123	0.017	0
Nó 24	123	0	0
Nó 25	123	0	0
Nó 26	123	0.025	0
Nó 27	120	0	0
Nó 28	120	0.009	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 29	120	0.005	0
Nó 30	119	0.057	0
Nó 31	119	0.005	0
Nó 32	118	0	0
Nó 33	118	0.013	0
Nó 34	122	0	0
Nó 35	122	0.013	0
Nó 36	122	0	0
Nó 37	122	0.009	0
Nó 38	122	0	0
Nó 39	118	0.002	0
Nó 40	118	0.021	0
Nó 41	118	0.009	0
Nó 42	117	0.002	0
Nó 43	119	0	0
Nó 44	116	0	0
Nó 45	116	0	0
Nó 46	116	0.005	0
Nó 47	109	0.017	0
Nó 48	119	0.041	0
Nó 49	121	0	0
Nó 50	121	0.021	0
Nó 51	122	0	0
Nó 52	122	0.025	0
Nó 53	122	0	0
Nó 54	120	0.007	0
Nó 55	126	0.041	0
Nó 56	124	0	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 57	124	0	0
Nó 58	126	0	0
Nó 59	125	0	0
Nó 60	124	0.165	0
Nó 61	123	0	0
Nó 62	122	0.013	0
Nó 63	123	0.002	0
Nó 64	122	0.003	0
Nó 65	124	0	0
Nó 66	124	0.023	0
Nó 67	124	0	0
Nó 68	124	0	0
Nó 69	120	0	0
Nó 70	120	0	0
Nó 71	120	0.149	0
Nó 72	120	0.013	0
Nó 73	109	0	0
Nó 74	109	0.06	0
Nó 75	100	0	0
Nó 76	93	0.021	0
Nó 77	88	0	0
Nó 78	84	0.002	0
Nó 79	117	0.002	0
Nó 80	118	0.1	0
Nó 81	126	0.023	0
Nó 82	128	0.009	0
Nó 83	128	0	0
Nó 84	115	0.009	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 85	126	0.017	0
Nó 86	121	0	0
Nó 87	115	0	0
Nó 88	124	0.073	0
Nó 89	115	0.009	0
Nó 90	115	0.025	0
Nó 91	124	0	0
Nó 92	124	0.013	0
Nó 93	110	0.005	0
Nó 94	100	0.005	0
Nó 95	102	0.021	0
Nó 96	109	0	0
Nó 97	120	0.009	0
Nó 98	93	0.013	0
Nó 99	95	0	0
Nó 100	93	0.002	0
Nó 101	87	0	0
Nó 102	84	0.023	0
Nó 103	77	0.069	0
Nó 105	110	0.009	0
Nó 107	106	0.001	0
Nó 108	106	0.012	0
Nó 109	106	0	0
Nó 110	106	0.002	0
Nó 116	120	0	0
Nó 117	93	0	0
Nó 118	84	0	0
Nó 119	84	0	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 120	84	0	0
Nó 121	84	0	0
Nó 122	81	0	0
Nó 123	77	0.033	0
Nó 124	81	0	0
Nó 125	79	0.017	0
Nó 126	81	0	0
Nó 127	81	0	0
Nó 128	79	0.017	0
Nó 129	81	0	0
Nó 130	81	0.089	0
Nó 131	79	0.037	0
Nó 132	80	0.041	0
Nó 106	79	0.056	0
Nó 111	80	0.081	0
Nó 112	80	0.073	0
Nó 114	89	0.009	0
Nó 115	89	0.033	0
Nó 133	100	0.105	0
Nó 134	97	0.14	0
Nó 135	99	0.016	0
Nó 136	85	0	0
Nó 137	90	0	0
Nó 138	75	0	0
Nó 139	88	0	0
Nó 140	92	0	0
Nó 141	92	0	0
Nó 142	92	0.037	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 143	75	0	0
Nó 144	75	0	0
Nó 145	73	0.291	0
Nó 146	63	0.173	0
Nó 147	75	0.005	0
Nó 148	75	0	0
Nó 149	75	0	0
Nó 150	74	0.009	0
Nó 151	76	0.033	0
Nó 152	75	0.021	0
Nó 153	76	0	0
Nó 154	76	0	0
Nó 155	76	0.057	0
Nó 156	77	0	0
Nó 157	77	0	0
Nó 158	77	0	0
Nó 159	74	0.033	0
Nó 160	83	0.017	0
Nó 161	83	0	0
Nó 162	83	0.005	0
Nó 175	83	0	0
Nó 176	83	0.197	0
Nó 177	83	0	0
Nó 178	83	0	0
Nó 179	83	0	0
Nó 180	83	0.009	0
Nó 181	83	0.005	0
Nó 182	92	0.002	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 183	91	0	0
Nó 184	91	0.029	0
Nó 185	81	0.009	0
Nó 186	82	0	0
Nó 187	82	0	0
Nó 188	82	0.141	0
Nó 189	82	0.005	0
Nó 190	82	0	0
Nó 191	82	0	0
Nó 192	81	0.025	0
Nó 193	82	0	0
Nó 194	82	0.005	0
Nó 195	92	0.029	0
Nó 196	83	0	0
Nó 163	77	0.241	0
Nó 164	77	0.002	0
Nó 165	94	0.011	0
Nó 166	83	0.021	0
Nó 167	77	0	0
Nó 168	77	0.002	0
Nó 169	75	0.005	0
Nó 170	75	0	0
Nó 171	81	0.121	0
Nó 172	86	0.181	0
Nó 173	78	0	0
Nó 174	95	0	0
Nó 197	95	0.065	0
Nó 198	84	0	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 199	108	0	0
Nó 200	110	0.113	0
Nó 201	92	0	0
Nó 202	89	0	0
Nó 203	85	0.009	0
Nó 204	81	0.013	0
Nó 205	93	0	0
Nó 206	117	0	0
Nó 207	120	0	0
Nó 208	124	0	0
Nó 209	126	0	0
Nó 210	126	0	0
Nó 211	128	0	0
Nó 214	127	0	0
Nó 215	130	0	0
Nó 216	130	0	0
Nó 218	89	0.005	0
Nó 219	78	0.025	0
Nó 220	110	0	0
Nó 221	105	0.041	0
Nó 222	105	0	0
Nó 223	110	0	0
Nó 224	93	0.006	0
Nó 225	93	0	0
Nó 226	93	0.164	0
Nó 227	93	0.003	0
Nó 228	117	0	0
Nó 229	117	0	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 230	117	0	0
Nó 231	118	0	0
Nó 232	118	0.005	0
Nó 233	118	0	0
Nó 234	118	0.005	0
Nó 235	117	0	0
Nó 236	117	0	0
Nó 237	117	0	0
Nó 238	118	0.145	0
Nó 239	118	0	0
Nó 240	118	0	0
Nó 241	118	0.201	0
Nó 242	117	0.105	0
Nó 243	117	0	0
Nó 244	108	0	0
Nó 245	79	0	0
Nó 246	79	0.005	0
Nó 247	77	0	0
Nó 248	79	0.013	0
Nó 249	77	0	0
Nó 250	79	0	0
Nó 251	79	0	0
Nó 252	80	0	0
Nó 253	80	0	0
Nó 254	80	0.085	0
Nó 255	80	0.021	0
Nó 256	80	0	0
Nó 257	85	0	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 258	85	0.013	0
Nó 259	85	0	0
Nó 260	85	0	0
Nó 261	85	0	0
Nó 262	85	0.117	0
Nó 263	85	0	0
Nó 264	83	0	0
Nó 265	83	0	0
Nó 266	80	0	0
Nó 267	80	0.029	0
Nó 268	83	0	0
Nó 269	83	0	0
Nó 270	80	0	0
Nó 271	80	0	0
Nó 272	80	0.037	0
Nó 273	83	0	0
Nó 274	83	0	0
Nó 275	85	0	0
Nó 276	80	0	0
Nó 277	80	0.017	0
Nó 278	83	0	0
Nó 279	83	0	0
Nó 280	83	0	0
Nó 281	83	0	0
Nó 282	85	0	0
Nó 283	85	0	0
Nó 284	85	0	0
Nó 285	83	0.013	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 286	83	0	0
Nó 287	83	0	0
Nó 288	83	0	0
Nó 289	106	0	0
Nó 290	100	0	0
Nó 291	96	0.002	0
Nó 292	96	0.01	0
Nó 293	96	0.017	0
Nó 294	84	0.009	0
Nó 295	106	0	0
Nó 296	96	0.025	0
Nó 297	84	0.029	0
Nó 298	81	0	0
Nó 299	81	0	0
Nó 300	79	0.009	0
Nó 301	79	0	0
Nó 302	79	0.029	0
Nó 303	79	0	0
Nó 304	79	0	0
Nó 305	79	0	0
Nó 306	79	0	0
Nó 307	79	0	0
Nó 308	79	0	0
Nó 309	79	0	0
Nó 310	79	0	0
Nó 311	79	0	0
Nó 312	79	0	0
Nó 313	79	0.077	0

ID do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS	Qualidade Inicial mg/L
Nó 314	79	0.033	0
Nó 315	79	0.035	0
Nó 316	77	0.029	0
Nó 317	77	0.025	0
Nó 318	77	0	0
Nó 319	77	0.017	0
Nó 320	73	0	0
Nó 321	73	0	0
Nó 322	66	0.013	0
Nó 323	72	0	0
Nó 324	72	0.009	0
Nó 325	76	0.025	0
Nó 326	70	0.002	0
Nó 328	63	0	0
RNF 113	54	#N/A	0.05
RNF 327	110	#N/A	0.2
RNV 104	106	#N/A	0
RNV 212	130	#N/A	0
RNV 213	130	#N/A	0
RNV 13	145	#N/A	0
RNV 217	75	#N/A	0

Tabela da Rede - Troços

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 2	263	200	140	0.1
Tubagem 3	388	200	140	0.1
Tubagem 5	229	125	140	0.1
Tubagem 6	250	63	140	0.1
Tubagem 8	179	63	140	0.1
Tubagem 10	238	125	140	0.1
Tubagem 13	308	125	140	0.1
Tubagem 14	4	63	140	0.1
Tubagem 15	208	63	140	0.1
Tubagem 16	92	63	140	0.1
Tubagem 17	12	63	140	0.1
Tubagem 19	220	63	140	0.1
Tubagem 20	25	125	140	0.1
Tubagem 23	8	63	140	0.1
Tubagem 24	233	125	140	0.1
Tubagem 25	383	63	140	0.1
Tubagem 28	71	125	140	0.1
Tubagem 29	71	63	140	0.1
Tubagem 31	408	63	140	0.1
Tubagem 32	187	63	140	0.1
Tubagem 34	77	63	140	0.1
Tubagem 36	242	125	140	0.1
Tubagem 37	17	125	140	0.1
Tubagem 38	196	63	140	0.1
Tubagem 40	242	63	140	0.1
Tubagem 42	48	63	140	0.1
Tubagem 43	87	63	140	0.1

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 46	186	125	140	0.1
Tubagem 47	300	125	140	0.1
Tubagem 48	171	125	140	0.1
Tubagem 50	17	63	140	0.1
Tubagem 51	96	125	140	0.1
Tubagem 52	67	125	140	0.1
Tubagem 55	242	63	140	0.1
Tubagem 56	96	63	140	0.1
Tubagem 58	237	63	140	0.1
Tubagem 59	73	63	140	0.1
Tubagem 60	206	63	140	0.1
Tubagem 61	83	63	140	0.1
Tubagem 63	108	63	140	0.1
Tubagem 64	250	63	140	0.1
Tubagem 66	1000	125	140	0.1
Tubagem 67	98	125	140	0.1
Tubagem 68	6	125	140	0.1
Tubagem 71	90	63	140	0.1
Tubagem 72	190	63	140	0.1
Tubagem 74	150	63	140	0.1
Tubagem 75	81	63	140	0.1
Tubagem 77	225	63	140	0.1
Tubagem 78	71	125	140	0.1
Tubagem 80	23	125	140	0.1
Tubagem 81	225	125	140	0.1
Tubagem 82	12	125	140	0.1
Tubagem 83	192	125	140	0.1
Tubagem 84	6	63	140	0.1

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 86	525	125	140	0.1
Tubagem 87	8	125	140	0.1
Tubagem 88	146	125	140	0.1
Tubagem 89	158	125	140	0.1
Tubagem 90	67	125	140	0.1
Tubagem 91	54	125	140	0.1
Tubagem 92	75	90	140	0.1
Tubagem 93	204	90	140	0.1
Tubagem 95	267	63	140	0.1
Tubagem 96	281	63	140	0.1
Tubagem 97	212	63	140	0.1
Tubagem 98	287	63	140	0.1
Tubagem 100	202	63	140	0.1
Tubagem 101	154	63	140	0.1
Tubagem 102	37	63	140	0.1
Tubagem 104	521	63	140	0.1
Tubagem 107	17	63	140	0.1
Tubagem 108	306	63	140	0.1
Tubagem 109	29	63	140	0.1
Tubagem 110	412	63	140	0.1
Tubagem 111	285	63	140	0.1
Tubagem 112	308	63	140	0.1
Tubagem 113	196	63	140	0.1
Tubagem 114	150	63	140	0.1
Tubagem 115	119	63	140	0.1
Tubagem 116	235	63	140	0.1
Tubagem 117	367	63	140	0.1
Tubagem 118	121	110	140	0.1

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 119	142	63	140	0.1
Tubagem 120	71	63	140	0.1
Tubagem 121	132	63	140	0.1
Tubagem 122	500	90	140	0.1
Tubagem 125	237	63	140	0.1
Tubagem 128	25	63	140	0.1
Tubagem 129	46	63	140	0.1
Tubagem 137	62	63	140	0.1
Tubagem 138	410	63	140	0.1
Tubagem 139	521	110	140	0.1
Tubagem 140	325	110	140	0.1
Tubagem 141	265	110	140	0.1
Tubagem 142	15	110	140	0.1
Tubagem 143	17	110	140	0.1
Tubagem 144	46	110	140	0.1
Tubagem 145	317	110	140	0.1
Tubagem 146	100	90	140	0.1
Tubagem 147	121	90	140	0.1
Tubagem 148	54	110	140	0.1
Tubagem 149	144	90	140	0.1
Tubagem 150	8	110	140	0.1
Tubagem 151	85	110	140	0.1
Tubagem 133	50	110	140	0.1
Tubagem 134	52	110	140	0.1
Tubagem 135	162	110	140	0.1
Tubagem 153	223	75	140	0.1
Tubagem 154	52	75	140	0.1
Tubagem 156	148	75	140	0.1

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 158	237	75	140	0.1
Tubagem 159	94	90	140	0.1
Tubagem 162	42	125	140	0.1
Tubagem 164	8	110	140	0.1
Tubagem 165	67	63	140	0.1
Tubagem 166	187	63	140	0.1
Tubagem 167	92	110	140	0.1
Tubagem 170	391	125	140	0.1
Tubagem 171	162	90	140	0.1
Tubagem 172	119	63	140	0.1
Tubagem 174	54	63	140	0.1
Tubagem 175	23	63	140	0.1
Tubagem 176	67	63	140	0.1
Tubagem 177	21	63	140	0.1
Tubagem 178	73	63	140	0.1
Tubagem 181	79	63	140	0.1
Tubagem 182	35	63	140	0.1
Tubagem 193	181	63	140	0.1
Tubagem 198	192	63	140	0.1
Tubagem 199	8	63	140	0.1
Tubagem 200	8	63	140	0.1
Tubagem 201	129	63	140	0.1
Tubagem 202	35	63	140	0.1
Tubagem 203	48	63	140	0.1
Tubagem 206	96	63	140	0.1
Tubagem 207	19	63	140	0.1
Tubagem 208	40	63	140	0.1
Tubagem 210	38	63	140	0.1

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 211	17	63	140	0.1
Tubagem 212	87	63	140	0.1
Tubagem 213	46	63	140	0.1
Tubagem 214	196	63	140	0.1
Tubagem 183	8	110	140	0.1
Tubagem 184	50	110	140	0.1
Tubagem 185	52	110	140	0.1
Tubagem 186	310	110	140	0.1
Tubagem 187	71	63	140	0.1
Tubagem 188	131	63	140	0.1
Tubagem 189	75	63	140	0.1
Tubagem 190	98	63	140	0.1
Tubagem 191	69	110	140	0.1
Tubagem 192	123	125	140	0.1
Tubagem 215	150	125	140	0.1
Tubagem 216	62	125	140	0.1
Tubagem 217	75	75	140	0.1
Tubagem 218	171	75	140	0.1
Tubagem 219	202	75	140	0.1
Tubagem 220	69	125	140	0.1
Tubagem 222	225	75	140	0.1
Tubagem 223	256	75	140	0.1
Tubagem 224	83	75	140	0.1
Tubagem 225	92	110	140	0.1
Tubagem 226	12	110	140	0.1
Tubagem 228	100	110	140	0.1
Tubagem 229	300	110	140	0.1
Tubagem 230	146	110	140	0.1

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 231	377	110	140	0.1
Tubagem 232	440	110	140	0.1
Tubagem 233	433	110	140	0.1
Tubagem 234	292	110	140	0.1
Tubagem 235	388	110	140	0.1
Tubagem 236	267	110	140	0.1
Tubagem 237	19	110	140	0.1
Tubagem 238	4	110	140	0.1
Tubagem 239	19	110	140	0.1
Tubagem 240	83	110	140	0.1
Tubagem 243	112	110	140	0.1
Tubagem 244	208	63	140	0.1
Tubagem 245	29	63	140	0.1
Tubagem 246	96	75	140	0.1
Tubagem 247	104	63	140	0.1
Tubagem 248	33	63	140	0.1
Tubagem 249	104	63	140	0.1
Tubagem 250	29	63	140	0.1
Tubagem 251	71	63	140	0.1
Tubagem 252	62	63	140	0.1
Tubagem 253	8	125	140	0.1
Tubagem 254	250	125	140	0.1
Tubagem 257	217	125	140	0.1
Tubagem 258	10	90	140	0.1
Tubagem 259	12	90	140	0.1
Tubagem 260	146	125	140	0.1
Tubagem 261	146	90	140	0.1
Tubagem 262	1000	200	140	0.1

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 265	183	90	140	0.1
Tubagem 268	17	90	140	0.1
Tubagem 269	204	90	140	0.1
Tubagem 270	50	125	140	0.1
Tubagem 271	79	125	140	0.1
Tubagem 272	283	125	140	0.1
Tubagem 273	90	125	140	0.1
Tubagem 275	87	90	140	0.1
Tubagem 276	244	125	140	0.1
Tubagem 278	44	110	140	0.1
Tubagem 280	146	110	140	0.1
Tubagem 281	83	110	140	0.1
Tubagem 283	46	110	140	0.1
Tubagem 284	10	110	140	0.1
Tubagem 286	217	110	140	0.1
Tubagem 288	94	110	140	0.1
Tubagem 290	4	110	140	0.1
Tubagem 291	71	110	140	0.1
Tubagem 295	94	110	140	0.1
Tubagem 296	33	110	140	0.1
Tubagem 297	94	110	140	0.1
Tubagem 298	37	110	140	0.1
Tubagem 302	96	110	140	0.1
Tubagem 303	96	110	140	0.1
Tubagem 304	33	90	140	0.1
Tubagem 305	35	110	140	0.1
Tubagem 309	17	110	140	0.1
Tubagem 310	96	110	140	0.1

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 311	4	110	140	0.1
Tubagem 313	83	110	140	0.1
Tubagem 315	83	110	140	0.1
Tubagem 316	83	110	140	0.1
Tubagem 317	83	110	140	0.1
Tubagem 319	83	110	140	0.1
Tubagem 320	17	110	140	0.1
Tubagem 321	100	110	140	0.1
Tubagem 322	69	75	140	0.1
Tubagem 323	175	75	140	0.1
Tubagem 324	125	75	140	0.1
Tubagem 325	54	75	140	0.1
Tubagem 326	237	75	140	0.1
Tubagem 327	179	75	140	0.1
Tubagem 328	315	63	140	0.1
Tubagem 329	4	63	140	0.1
Tubagem 330	4	75	140	0.1
Tubagem 331	250	75	140	0.1
Tubagem 332	354	75	140	0.1
Tubagem 333	54	90	140	0.1
Tubagem 334	100	90	140	0.1
Tubagem 335	35	90	140	0.1
Tubagem 337	83	90	140	0.1
Tubagem 339	83	90	140	0.1
Tubagem 341	12	90	140	0.1
Tubagem 344	29	90	140	0.1
Tubagem 345	83	90	140	0.1
Tubagem 346	6	90	140	0.1

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Tubagem 347	233	90	140	0.1
Tubagem 348	133	90	140	0.1
Tubagem 349	50	63	140	0.1
Tubagem 350	140	63	140	0.1
Tubagem 351	262	63	140	0.1
Tubagem 352	58	63	140	0.1
Tubagem 353	92	63	140	0.1
Tubagem 355	154	63	140	0.1
Tubagem 356	44	63	140	0.1
Tubagem 357	35	63	140	0.1
Tubagem 358	117	63	140	0.1
Tubagem 359	144	63	140	0.1
Tubagem 221	21	200	140	0.1
Tubagem 342	333	140	120	0.1
Bomba 1	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Bomba 241	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Bomba 242	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Bomba 136	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Bomba 361	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Válvula 4	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 7	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 9	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 11	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 12	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 18	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 21	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 22	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 26	#N/A	63	#N/A	#N/A

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Válvula 27	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 30	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 33	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 35	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 39	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 41	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 44	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 45	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 49	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 53	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 54	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 57	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 62	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 65	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 69	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 70	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 73	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 76	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 79	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 85	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 94	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 99	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 103	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 105	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 106	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 124	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 127	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 131	#N/A	90	#N/A	#N/A

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Válvula 132	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 123	#N/A	75	#N/A	#N/A
Válvula 152	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 160	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 161	#N/A	75	#N/A	#N/A
Válvula 163	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 168	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 169	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 173	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 179	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 180	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 194	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 195	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 196	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 197	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 204	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 205	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 209	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 157	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 155	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 227	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 255	#N/A	125	#N/A	#N/A
Válvula 256	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 263	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 264	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 266	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 267	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 274	#N/A	90	#N/A	#N/A

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Coef.R.Escoam.
Válvula 277	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 279	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 282	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 285	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 287	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 289	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 292	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 293	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 294	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 299	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 300	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 301	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 306	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 307	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 308	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 312	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 314	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 318	#N/A	110	#N/A	#N/A
Válvula 126	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 130	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 336	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 338	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 340	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 343	#N/A	90	#N/A	#N/A
Válvula 354	#N/A	63	#N/A	#N/A
Válvula 360	#N/A	63	#N/A	#N/A

ANEXO C: TABELA DA REDE – TEMPO DE PERCURSO (AGE) E CONSUMO

Tabela da Rede - Nós às 72:00 Horas

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 1	0.00	94.03
Nó 2	0.01	94.31
Nó 3	0.00	94.68
Nó 4	0.01	94.66
Nó 5	0.00	94.82
Nó 6	0.00	94.80
Nó 7	0.00	95.29
Nó 8	0.01	95.03
Nó 9	0.00	95.01
Nó 10	0.00	95.42
Nó 11	0.00	94.87
Nó 14	0.05	94.66
Nó 15	0.00	94.91
Nó 16	0.01	94.92
Nó 17	0.00	95.38
Nó 18	0.00	95.33
Nó 19	0.00	95.40
Nó 12	0.00	95.06
Nó 20	0.00	95.07
Nó 21	0.00	95.06
Nó 22	0.01	95.05
Nó 23	0.01	95.82
Nó 24	0.00	95.81
Nó 25	0.00	95.45
Nó 26	0.01	96.85
Nó 27	0.00	96.90
Nó 28	0.00	96.87

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 29	0.00	113.03
Nó 30	0.03	95.87
Nó 31	0.00	97.16
Nó 32	0.00	95.91
Nó 33	0.01	95.90
Nó 34	0.00	96.43
Nó 35	0.01	95.35
Nó 36	0.00	95.85
Nó 37	0.00	96.16
Nó 38	0.00	95.92
Nó 39	0.00	96.14
Nó 40	0.01	96.13
Nó 41	0.00	96.13
Nó 42	0.00	72.00
Nó 43	0.00	96.57
Nó 44	0.00	96.75
Nó 45	0.00	72.00
Nó 46	0.00	96.74
Nó 47	0.01	96.89
Nó 48	0.02	97.32
Nó 49	0.00	96.59
Nó 50	0.01	96.58
Nó 51	0.00	97.42
Nó 52	0.01	96.99
Nó 53	0.00	96.48
Nó 54	0.00	97.59
Nó 55	0.02	95.36
Nó 56	0.00	95.45

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 57	0.00	96.38
Nó 58	0.00	94.91
Nó 59	0.00	95.04
Nó 60	0.08	96.46
Nó 61	0.00	95.87
Nó 62	0.01	97.21
Nó 63	0.00	95.86
Nó 64	0.00	96.70
Nó 65	0.00	96.05
Nó 66	0.01	97.55
Nó 67	0.00	96.40
Nó 68	0.00	96.43
Nó 69	0.00	96.77
Nó 70	0.00	96.80
Nó 71	0.07	97.44
Nó 72	0.01	97.50
Nó 73	0.00	97.78
Nó 74	0.03	99.30
Nó 75	0.00	97.97
Nó 76	0.01	98.22
Nó 77	0.00	98.42
Nó 78	0.00	72.00
Nó 79	0.00	98.61
Nó 80	0.05	100.30
Nó 81	0.01	94.86
Nó 82	0.00	95.50
Nó 83	0.00	97.52
Nó 84	0.00	97.65

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 85	0.01	94.92
Nó 86	0.00	95.38
Nó 87	0.00	96.68
Nó 88	0.04	95.83
Nó 89	0.00	97.35
Nó 90	0.01	97.64
Nó 91	0.00	96.43
Nó 92	0.01	96.44
Nó 93	0.00	120.83
Nó 94	0.00	97.04
Nó 95	0.01	98.70
Nó 96	0.00	99.54
Nó 97	0.00	96.81
Nó 98	0.01	103.47
Nó 99	0.00	101.95
Nó 100	0.00	71.88
Nó 101	0.00	103.72
Nó 102	0.01	104.24
Nó 103	0.03	110.95
Nó 105	0.00	97.88
Nó 107	0.00	120.72
Nó 108	0.01	100.98
Nó 109	0.00	100.21
Nó 110	0.00	98.23
Nó 116	0.00	96.75
Nó 117	0.00	98.30
Nó 118	0.00	99.27
Nó 119	0.00	100.04

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 120	0.00	100.07
Nó 121	0.00	100.12
Nó 122	0.00	100.24
Nó 123	0.02	112.99
Nó 124	0.00	100.21
Nó 125	0.01	106.09
Nó 126	0.00	100.39
Nó 127	0.00	100.37
Nó 128	0.01	107.32
Nó 129	0.00	100.42
Nó 130	0.04	100.42
Nó 131	0.02	103.51
Nó 132	0.02	100.77
Nó 106	0.03	105.56
Nó 111	0.04	101.66
Nó 112	0.04	101.02
Nó 114	0.00	98.41
Nó 115	0.02	98.38
Nó 133	0.05	98.88
Nó 134	0.07	99.09
Nó 135	0.01	100.27
Nó 136	0.00	98.94
Nó 137	0.00	99.29
Nó 138	0.00	75.56
Nó 139	0.00	98.41
Nó 140	0.00	98.53
Nó 141	0.00	98.52
Nó 142	0.02	98.52

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 143	0.00	75.53
Nó 144	0.00	76.30
Nó 145	0.15	77.30
Nó 146	0.09	71.63
Nó 147	0.00	76.35
Nó 148	0.00	77.18
Nó 149	0.00	77.18
Nó 150	0.00	79.55
Nó 151	0.02	71.62
Nó 152	0.01	71.55
Nó 153	0.00	71.55
Nó 154	0.00	71.45
Nó 155	0.03	71.39
Nó 156	0.00	71.50
Nó 157	0.00	71.75
Nó 158	0.00	72.09
Nó 159	0.02	79.46
Nó 160	0.01	79.79
Nó 161	0.00	71.40
Nó 162	0.00	71.47
Nó 175	0.00	71.37
Nó 176	0.10	71.36
Nó 177	0.00	79.39
Nó 178	0.00	79.35
Nó 179	0.00	79.31
Nó 180	0.00	79.25
Nó 181	0.00	75.35
Nó 182	0.00	85.45

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 183	0.00	71.31
Nó 184	0.01	73.04
Nó 185	0.00	71.56
Nó 186	0.00	71.40
Nó 187	0.00	75.13
Nó 188	0.07	74.58
Nó 189	0.00	85.26
Nó 190	0.00	71.34
Nó 191	0.00	79.98
Nó 192	0.01	73.32
Nó 193	0.00	79.52
Nó 194	0.00	79.64
Nó 195	0.01	71.38
Nó 196	0.00	79.40
Nó 163	0.12	72.12
Nó 164	0.00	74.54
Nó 165	0.01	90.90
Nó 166	0.01	97.21
Nó 167	0.00	106.97
Nó 168	0.00	102.41
Nó 169	0.00	71.82
Nó 170	0.00	75.53
Nó 171	0.06	99.25
Nó 172	0.09	99.23
Nó 173	0.00	101.98
Nó 174	0.00	98.97
Nó 197	0.03	104.42
Nó 198	0.00	103.47

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 199	0.00	99.80
Nó 200	0.06	105.45
Nó 201	0.00	105.94
Nó 202	0.00	98.45
Nó 203	0.00	119.78
Nó 204	0.01	105.28
Nó 205	0.00	77.32
Nó 206	0.00	77.72
Nó 207	0.00	74.31
Nó 208	0.00	71.61
Nó 209	0.00	71.89
Nó 210	0.00	71.83
Nó 211	0.00	72.03
Nó 214	0.00	72.14
Nó 215	0.00	72.15
Nó 216	0.00	72.15
Nó 218	0.00	98.45
Nó 219	0.01	102.28
Nó 220	0.00	72.00
Nó 221	0.02	100.51
Nó 222	0.00	100.76
Nó 223	0.00	72.00
Nó 224	0.00	101.00
Nó 225	0.00	72.00
Nó 226	0.08	101.19
Nó 227	0.00	110.37
Nó 228	0.00	96.96
Nó 229	0.00	96.99

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 230	0.00	96.99
Nó 231	0.00	99.86
Nó 232	0.00	99.85
Nó 233	0.00	99.93
Nó 234	0.00	99.92
Nó 235	0.00	95.84
Nó 236	0.00	97.70
Nó 237	0.00	95.82
Nó 238	0.07	96.43
Nó 239	0.00	96.41
Nó 240	0.00	96.69
Nó 241	0.10	98.62
Nó 242	0.05	98.01
Nó 243	0.00	98.02
Nó 244	0.00	122.95
Nó 245	0.00	72.00
Nó 246	0.00	72.00
Nó 247	0.00	74.91
Nó 248	0.01	71.02
Nó 249	0.00	75.25
Nó 250	0.00	78.22
Nó 251	0.00	79.55
Nó 252	0.00	72.30
Nó 253	0.00	73.48
Nó 254	0.04	72.98
Nó 255	0.01	83.85
Nó 256	0.00	83.97
Nó 257	0.00	73.09

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 258	0.01	72.03
Nó 259	0.00	85.37
Nó 260	0.00	85.55
Nó 261	0.00	85.25
Nó 262	0.06	85.20
Nó 263	0.00	73.85
Nó 264	0.00	101.19
Nó 265	0.00	101.10
Nó 266	0.00	95.72
Nó 267	0.01	90.91
Nó 268	0.00	87.20
Nó 269	0.00	103.00
Nó 270	0.00	71.22
Nó 271	0.00	72.00
Nó 272	0.02	72.83
Nó 273	0.00	70.69
Nó 274	0.00	70.72
Nó 275	0.00	85.20
Nó 276	0.00	76.10
Nó 277	0.01	76.34
Nó 278	0.00	88.17
Nó 279	0.00	83.37
Nó 280	0.00	89.95
Nó 281	0.00	87.83
Nó 282	0.00	84.29
Nó 283	0.00	82.28
Nó 284	0.00	71.67
Nó 285	0.01	86.27

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 286	0.00	104.96
Nó 287	0.00	87.07
Nó 288	0.00	99.53
Nó 289	0.00	98.33
Nó 290	0.00	98.60
Nó 291	0.00	117.22
Nó 292	0.00	100.56
Nó 293	0.01	99.01
Nó 294	0.00	99.31
Nó 295	0.00	98.19
Nó 296	0.01	107.40
Nó 297	0.01	99.91
Nó 298	0.00	100.04
Nó 299	0.00	100.04
Nó 300	0.00	100.30
Nó 301	0.00	100.28
Nó 302	0.01	100.34
Nó 303	0.00	72.00
Nó 304	0.00	71.95
Nó 305	0.00	71.95
Nó 306	0.00	72.00
Nó 307	0.00	71.95
Nó 308	0.00	72.00
Nó 309	0.00	72.00
Nó 310	0.00	72.00
Nó 311	0.00	71.95
Nó 312	0.00	72.00
Nó 313	0.04	101.11

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 314	0.02	101.68
Nó 315	0.02	102.30
Nó 316	0.01	102.18
Nó 317	0.01	105.18
Nó 318	0.00	107.11
Nó 319	0.01	109.26
Nó 320	0.00	102.58
Nó 321	0.00	102.57
Nó 322	0.01	108.35
Nó 323	0.00	102.98
Nó 324	0.00	102.98
Nó 325	0.01	106.02
Nó 326	0.00	115.28
Nó 328	0.00	60.00
RNF 113	0.00	60.00
RNF 327	-38.26	60.00
RNV 104	0.00	72.44
RNV 212	4.41	72.35
RNV 213	4.55	72.33
RNV 13	36.32	94.01
RNV 217	-9.83	75.61

**ANEXO D: TABELA DA REDE – ALUMÍNIO, CONSUMO, CARGA HIDRÁULICA
E PRESSÃO**

Tabela da Rede - Nós às 72:00 Horas

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 1	0.00	150.00	20.00	0.23
Nó 2	0.01	149.99	22.99	0.23
Nó 3	0.00	149.98	21.98	0.23
Nó 4	0.01	149.98	21.98	0.23
Nó 5	0.00	149.97	22.97	0.24
Nó 6	0.00	149.97	22.97	0.24
Nó 7	0.00	149.96	23.96	0.24
Nó 8	0.01	149.95	24.95	0.24
Nó 9	0.00	149.95	24.95	0.24
Nó 10	0.00	149.95	23.95	0.24
Nó 11	0.00	149.96	23.96	0.24
Nó 14	0.05	149.98	21.98	0.23
Nó 15	0.00	149.96	23.96	0.24
Nó 16	0.01	149.96	23.96	0.24
Nó 17	0.00	149.95	23.95	0.24
Nó 18	0.00	149.94	27.94	0.24
Nó 19	0.00	149.95	23.95	0.24
Nó 12	0.00	149.95	24.95	0.24
Nó 20	0.00	149.95	24.95	0.24
Nó 21	0.00	149.95	24.95	0.24
Nó 22	0.01	149.95	24.95	0.24
Nó 23	0.01	149.94	26.94	0.24
Nó 24	0.00	149.94	26.94	0.24
Nó 25	0.00	149.94	26.94	0.24
Nó 26	0.01	149.94	26.94	0.24
Nó 27	0.00	149.93	29.93	0.24
Nó 28	0.00	149.93	29.93	0.24

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 29	0.00	149.93	29.93	0.24
Nó 30	0.03	149.93	30.93	0.24
Nó 31	0.00	149.93	30.93	0.24
Nó 32	0.00	149.93	31.93	0.24
Nó 33	0.01	149.93	31.93	0.24
Nó 34	0.00	149.93	27.93	0.23
Nó 35	0.01	149.94	27.94	0.24
Nó 36	0.00	149.93	27.93	0.24
Nó 37	0.00	149.93	27.93	0.24
Nó 38	0.00	149.93	27.93	0.24
Nó 39	0.00	149.93	31.93	0.23
Nó 40	0.01	149.93	31.93	0.23
Nó 41	0.00	149.93	31.93	0.23
Nó 42	0.00	149.93	32.93	0.00
Nó 43	0.00	149.92	30.92	0.23
Nó 44	0.00	149.92	33.92	0.23
Nó 45	0.00	149.92	33.92	0.00
Nó 46	0.00	149.92	33.92	0.23
Nó 47	0.01	149.92	40.92	0.23
Nó 48	0.02	149.92	30.92	0.23
Nó 49	0.00	149.93	28.93	0.23
Nó 50	0.01	149.93	28.93	0.23
Nó 51	0.00	149.93	27.93	0.23
Nó 52	0.01	149.93	27.93	0.23
Nó 53	0.00	149.93	27.93	0.23
Nó 54	0.00	149.93	29.93	0.22
Nó 55	0.02	149.95	23.95	0.24
Nó 56	0.00	149.94	25.94	0.24

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 57	0.00	149.93	25.93	0.24
Nó 58	0.00	149.96	23.96	0.24
Nó 59	0.00	149.96	24.96	0.24
Nó 60	0.08	149.93	25.93	0.24
Nó 61	0.00	149.93	26.93	0.23
Nó 62	0.01	149.93	27.93	0.23
Nó 63	0.00	149.93	26.93	0.23
Nó 64	0.00	149.93	27.93	0.23
Nó 65	0.00	149.93	25.93	0.23
Nó 66	0.01	149.93	25.93	0.23
Nó 67	0.00	149.93	25.93	0.24
Nó 68	0.00	149.93	25.93	0.24
Nó 69	0.00	149.93	29.93	0.24
Nó 70	0.00	149.93	29.93	0.24
Nó 71	0.07	149.93	29.93	0.23
Nó 72	0.01	149.93	29.93	0.23
Nó 73	0.00	149.92	40.92	0.23
Nó 74	0.03	149.92	40.92	0.23
Nó 75	0.00	149.92	49.92	0.22
Nó 76	0.01	149.91	56.91	0.22
Nó 77	0.00	149.91	61.91	0.22
Nó 78	0.00	149.91	65.91	0.00
Nó 79	0.00	149.92	32.92	0.22
Nó 80	0.05	149.92	31.92	0.22
Nó 81	0.01	149.96	23.96	0.24
Nó 82	0.00	149.96	21.96	0.24
Nó 83	0.00	149.96	21.96	0.24
Nó 84	0.00	149.95	34.95	0.24

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 85	0.01	149.96	23.96	0.24
Nó 86	0.00	149.96	28.96	0.24
Nó 87	0.00	149.95	34.95	0.24
Nó 88	0.04	149.93	25.93	0.24
Nó 89	0.00	149.93	34.93	0.24
Nó 90	0.01	149.93	34.93	0.24
Nó 91	0.00	149.93	25.93	0.24
Nó 92	0.01	149.93	25.93	0.24
Nó 93	0.00	149.95	39.95	0.24
Nó 94	0.00	149.93	49.93	0.23
Nó 95	0.01	149.93	47.93	0.23
Nó 96	0.00	149.93	40.93	0.23
Nó 97	0.00	149.93	29.93	0.24
Nó 98	0.01	149.92	56.92	0.23
Nó 99	0.00	149.92	54.92	0.23
Nó 100	0.00	149.92	56.92	0.00
Nó 101	0.00	149.92	62.92	0.22
Nó 102	0.01	149.92	65.92	0.22
Nó 103	0.03	149.92	72.92	0.22
Nó 105	0.00	149.90	39.90	0.24
Nó 107	0.00	149.86	43.86	0.22
Nó 108	0.01	149.86	43.86	0.24
Nó 109	0.00	149.86	43.86	0.24
Nó 110	0.00	149.86	43.86	0.24
Nó 116	0.00	149.93	29.93	0.24
Nó 117	0.00	149.92	56.92	0.23
Nó 118	0.00	149.92	65.92	0.23
Nó 119	0.00	149.92	65.92	0.23

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 120	0.00	149.92	65.92	0.23
Nó 121	0.00	149.92	65.92	0.23
Nó 122	0.00	149.92	68.92	0.23
Nó 123	0.02	149.92	72.92	0.23
Nó 124	0.00	149.92	68.92	0.23
Nó 125	0.01	149.92	70.92	0.23
Nó 126	0.00	149.92	68.92	0.23
Nó 127	0.00	149.92	68.92	0.23
Nó 128	0.01	149.92	70.92	0.23
Nó 129	0.00	149.92	68.92	0.23
Nó 130	0.04	149.92	68.92	0.23
Nó 131	0.02	149.92	70.92	0.23
Nó 132	0.02	149.92	69.92	0.23
Nó 106	0.03	149.92	70.92	0.22
Nó 111	0.04	149.92	69.92	0.22
Nó 112	0.04	149.92	69.92	0.22
Nó 114	0.00	149.91	60.91	0.22
Nó 115	0.02	149.91	60.91	0.22
Nó 133	0.05	149.91	49.91	0.22
Nó 134	0.07	149.91	52.91	0.22
Nó 135	0.01	149.91	50.91	0.22
Nó 136	0.00	149.91	64.91	0.22
Nó 137	0.00	149.91	59.91	0.22
Nó 138	0.00	153.64	78.64	0.05
Nó 139	0.00	149.91	61.91	0.22
Nó 140	0.00	149.91	57.91	0.22
Nó 141	0.00	149.91	57.91	0.22
Nó 142	0.02	149.91	57.91	0.22

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 143	0.00	153.56	78.56	0.05
Nó 144	0.00	153.56	78.56	0.05
Nó 145	0.15	153.55	80.55	0.05
Nó 146	0.09	153.55	90.55	0.02
Nó 147	0.00	152.70	77.70	0.05
Nó 148	0.00	152.70	77.70	0.05
Nó 149	0.00	152.70	77.70	0.05
Nó 150	0.00	152.70	78.70	0.05
Nó 151	0.02	152.66	76.66	0.01
Nó 152	0.01	152.69	77.69	0.01
Nó 153	0.00	152.65	76.65	0.01
Nó 154	0.00	152.65	76.65	0.01
Nó 155	0.03	152.65	76.65	0.01
Nó 156	0.00	152.64	75.64	0.01
Nó 157	0.00	152.64	75.64	0.02
Nó 158	0.00	152.64	75.64	0.03
Nó 159	0.02	152.64	78.64	0.05
Nó 160	0.01	152.63	69.63	0.05
Nó 161	0.00	152.63	69.63	0.02
Nó 162	0.00	152.63	69.63	0.02
Nó 175	0.00	152.62	69.62	0.02
Nó 176	0.10	152.62	69.62	0.02
Nó 177	0.00	152.62	69.62	0.05
Nó 178	0.00	152.62	69.62	0.05
Nó 179	0.00	152.62	69.62	0.05
Nó 180	0.00	152.62	69.62	0.05
Nó 181	0.00	152.62	69.62	0.03
Nó 182	0.00	152.62	60.62	0.04

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 183	0.00	152.62	61.62	0.03
Nó 184	0.01	152.62	61.62	0.03
Nó 185	0.00	152.62	71.62	0.02
Nó 186	0.00	152.62	70.62	0.02
Nó 187	0.00	152.62	70.62	0.04
Nó 188	0.07	152.62	70.62	0.04
Nó 189	0.00	152.62	70.62	0.04
Nó 190	0.00	152.62	70.62	0.02
Nó 191	0.00	152.62	70.62	0.04
Nó 192	0.01	152.62	71.62	0.04
Nó 193	0.00	152.62	70.62	0.04
Nó 194	0.00	152.62	70.62	0.04
Nó 195	0.01	152.62	60.62	0.04
Nó 196	0.00	152.62	69.62	0.04
Nó 163	0.12	153.64	76.64	0.02
Nó 164	0.00	153.64	76.64	0.03
Nó 165	0.01	153.64	59.64	0.06
Nó 166	0.01	153.64	70.64	0.05
Nó 167	0.00	153.64	76.64	0.06
Nó 168	0.00	153.64	76.64	0.06
Nó 169	0.00	153.64	78.64	0.01
Nó 170	0.00	153.64	78.64	0.05
Nó 171	0.06	149.91	68.91	0.22
Nó 172	0.09	149.91	63.91	0.22
Nó 173	0.00	149.91	71.91	0.22
Nó 174	0.00	149.91	54.91	0.22
Nó 197	0.03	149.91	54.91	0.22
Nó 198	0.00	149.91	65.91	0.22

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 199	0.00	149.91	41.91	0.22
Nó 200	0.06	149.91	39.91	0.22
Nó 201	0.00	149.91	57.91	0.22
Nó 202	0.00	149.91	60.91	0.22
Nó 203	0.00	149.91	64.91	0.22
Nó 204	0.01	149.91	68.91	0.22
Nó 205	0.00	150.14	57.14	0.05
Nó 206	0.00	148.89	31.89	0.05
Nó 207	0.00	145.68	25.68	0.03
Nó 208	0.00	141.93	17.93	0.00
Nó 209	0.00	138.24	12.24	0.00
Nó 210	0.00	138.24	12.24	0.00
Nó 211	0.00	135.74	7.74	0.00
Nó 214	0.00	132.44	5.44	0.00
Nó 215	0.00	130.16	0.16	0.00
Nó 216	0.00	130.15	0.15	0.00
Nó 218	0.00	149.91	60.91	0.22
Nó 219	0.01	149.91	71.91	0.22
Nó 220	0.00	149.91	39.91	0.00
Nó 221	0.02	149.91	44.91	0.22
Nó 222	0.00	149.90	44.90	0.22
Nó 223	0.00	149.90	39.90	0.00
Nó 224	0.00	149.90	56.90	0.22
Nó 225	0.00	149.90	56.90	0.00
Nó 226	0.08	149.90	56.90	0.22
Nó 227	0.00	149.90	56.90	0.22
Nó 228	0.00	149.93	32.93	0.23
Nó 229	0.00	149.93	32.93	0.23

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 230	0.00	149.93	32.93	0.23
Nó 231	0.00	149.93	31.93	0.23
Nó 232	0.00	149.93	31.93	0.23
Nó 233	0.00	149.93	31.93	0.23
Nó 234	0.00	149.93	31.93	0.23
Nó 235	0.00	149.92	32.92	0.19
Nó 236	0.00	149.92	32.92	0.23
Nó 237	0.00	149.92	32.92	0.19
Nó 238	0.07	149.92	31.92	0.18
Nó 239	0.00	149.92	31.92	0.18
Nó 240	0.00	149.92	31.92	0.18
Nó 241	0.10	149.92	31.92	0.22
Nó 242	0.05	149.92	32.92	0.23
Nó 243	0.00	149.92	32.92	0.23
Nó 244	0.00	149.92	41.92	0.23
Nó 245	0.00	149.92	70.92	0.00
Nó 246	0.00	149.92	70.92	0.00
Nó 247	0.00	152.70	75.70	0.03
Nó 248	0.01	152.70	73.70	0.02
Nó 249	0.00	152.70	75.70	0.03
Nó 250	0.00	152.70	73.70	0.05
Nó 251	0.00	152.70	73.70	0.05
Nó 252	0.00	152.70	72.70	0.02
Nó 253	0.00	152.70	72.70	0.03
Nó 254	0.04	152.70	72.70	0.03
Nó 255	0.01	152.70	72.70	0.05
Nó 256	0.00	152.70	72.70	0.05
Nó 257	0.00	152.70	67.70	0.02

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 258	0.01	152.70	67.70	0.02
Nó 259	0.00	152.70	67.70	0.04
Nó 260	0.00	152.70	67.70	0.04
Nó 261	0.00	152.70	67.70	0.04
Nó 262	0.06	152.70	67.70	0.04
Nó 263	0.00	152.70	67.70	0.04
Nó 264	0.00	152.70	69.70	0.03
Nó 265	0.00	152.70	69.70	0.03
Nó 266	0.00	152.70	72.70	0.04
Nó 267	0.01	152.70	72.70	0.04
Nó 268	0.00	152.70	69.70	0.04
Nó 269	0.00	152.70	69.70	0.04
Nó 270	0.00	152.70	72.70	0.01
Nó 271	0.00	152.70	72.70	0.00
Nó 272	0.02	152.70	72.70	0.03
Nó 273	0.00	152.70	69.70	0.04
Nó 274	0.00	152.70	69.70	0.04
Nó 275	0.00	152.70	67.70	0.04
Nó 276	0.00	152.70	72.70	0.05
Nó 277	0.01	152.70	72.70	0.05
Nó 278	0.00	152.70	69.70	0.04
Nó 279	0.00	152.70	69.70	0.03
Nó 280	0.00	152.70	69.70	0.03
Nó 281	0.00	152.70	69.70	0.03
Nó 282	0.00	152.70	67.70	0.04
Nó 283	0.00	152.70	67.70	0.04
Nó 284	0.00	152.70	67.70	0.00
Nó 285	0.01	152.70	69.70	0.02

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 286	0.00	152.70	69.70	0.06
Nó 287	0.00	152.70	69.70	0.03
Nó 288	0.00	152.70	69.70	0.04
Nó 289	0.00	149.86	43.86	0.24
Nó 290	0.00	149.85	49.85	0.23
Nó 291	0.00	149.85	53.85	0.23
Nó 292	0.00	149.85	53.85	0.23
Nó 293	0.01	149.84	53.84	0.23
Nó 294	0.00	149.83	65.83	0.23
Nó 295	0.00	149.86	43.86	0.24
Nó 296	0.01	149.85	53.85	0.23
Nó 297	0.01	149.82	65.82	0.23
Nó 298	0.00	149.82	68.82	0.23
Nó 299	0.00	149.82	68.82	0.23
Nó 300	0.00	149.82	70.82	0.23
Nó 301	0.00	149.82	70.82	0.23
Nó 302	0.01	149.82	70.82	0.23
Nó 303	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 304	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 305	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 306	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 307	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 308	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 309	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 310	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 311	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 312	0.00	149.82	70.82	0.00
Nó 313	0.04	149.82	70.82	0.23

ID do Nó	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Alumínio mg/L
Nó 314	0.02	149.82	70.82	0.22
Nó 315	0.02	149.82	70.82	0.22
Nó 316	0.01	149.81	72.81	0.22
Nó 317	0.01	149.81	72.81	0.22
Nó 318	0.00	149.81	72.81	0.22
Nó 319	0.01	149.81	72.81	0.22
Nó 320	0.00	149.81	76.81	0.22
Nó 321	0.00	149.81	76.81	0.22
Nó 322	0.01	149.81	83.81	0.22
Nó 323	0.00	149.81	77.81	0.22
Nó 324	0.00	149.81	77.81	0.22
Nó 325	0.01	149.81	73.81	0.22
Nó 326	0.00	149.81	79.81	0.15
Nó 328	0.00	75.79	12.79	0.05
RNF 113	0.00	54.00	0.00	0.05
RNF 327	-38.26	110.00	0.00	0.20
RNV 104	0.00	109.80	3.80	0.00
RNV 212	4.41	130.11	0.11	0.00
RNV 213	4.55	130.11	0.11	0.00
RNV 13	36.32	150.00	5.00	0.23
RNV 217	-9.83	75.79	0.79	0.05